N°471 • 6,50 € JANVIER 2013

LA Recherche

L'actualité des sciences

Numéro spécial

Cellules souches

Génome

Mars

Rayons gamma

Boson de Higgs

LES 10 PLUS BELLES DÉCOUVERTES DE L'ANNÉE

Énergie noire

Sida

Tore plat

ENTRETIEN AVEC GENEVIÈVE FIORASO,
ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

Les grands rendez-vous de la science en 2013

LA RECHERCHE
MENSUEL DOM 6,90 € BEL 7,50 € LUX 7,50 € D 8,20 € ESP 7,50 € GR 7,50 € ITA 7,50 € PORT.CONT 7,50 € CAN 10,50 $ CAN CH 13 FS MAR 63 DH TUN 6,50 TND MAYOTTE 8,90 € TOM S 970 XPF TOM A 1620 XPF - ISSN 002956711
M 01108 - 471 S - F: 6,50 € - RD

la recherche

L'Inserm est l'organisme public dédié à la recherche biologique, médicale et à la santé humaine. Il se positionne sur l'ensemble du parcours, allant du laboratoire de recherche au lit du patient.

Plus de 13 500 chercheurs, ingénieurs et techniciens relevant de l'Inserm, des universités, des hôpitaux et des autres établissements de recherche travaillent dans les 300 laboratoires de l'Inserm sur l'ensemble du territoire.

L'Inserm recrute par concours

115 chercheurs

Santé publique • Microbiologie
Immunologie • Génétique • Biotechnologies
Neurosciences • Biochimie • Cancer
Biologie moléculaire et cellulaire
Physiologie et physiopathologie...

Instituts thématiques Inserm
Institut national de la santé et de la recherche médicale

Inscriptions et retraits des dossiers à partir du 10 décembre 2012
Modalités des concours : www.eva2.inserm.fr

Rejoignez-nous sur Facebook

Alba Interactive

cnrs

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs formation entreprises

16 axes de formation

- Electronique
- Génie logiciel
- Modélisation
- Traitement du signal optique
- Mise en œuvre des matériaux
- Caractérisation des matériaux
- Sécurité, radioprotection
- Microscopies
- Chromatographies
- Spectroscopie et analyse
- Spectrométrie de masse
- Résonance magnétique nucléaire
- Biologie
- Bioinformatique
- Expérimentation animale
- Qualité, environnement, climat

Des formations aux technologies de pointe pour les ingénieurs et les techniciens

Des stages de courte durée (3 à 5 jours) se déroulant dans les laboratoires du cnrs en effectifs réduits (env. 10 stagiaires)

Une pédagogie basée sur l'expérimentation

La possibilité de stages organisés en intra-entreprise

cnrsformation.cnrs.fr

cfe.contact@cnrs.fr - 01 69 82 44 55

Une « fertilisation » illégale de l'océan sème le trouble

Sous prétexte d'aider des communautés de pêcheurs, un homme d'affaires californien a, sans autorisation, fait déverser plusieurs dizaines de tonnes de sulfate de fer dans le Pacifique. Ce précédent souligne l'urgence d'établir un cadre réglementaire mondial dissuasif.

PAR **Fabienne Lemarchand**, journaliste

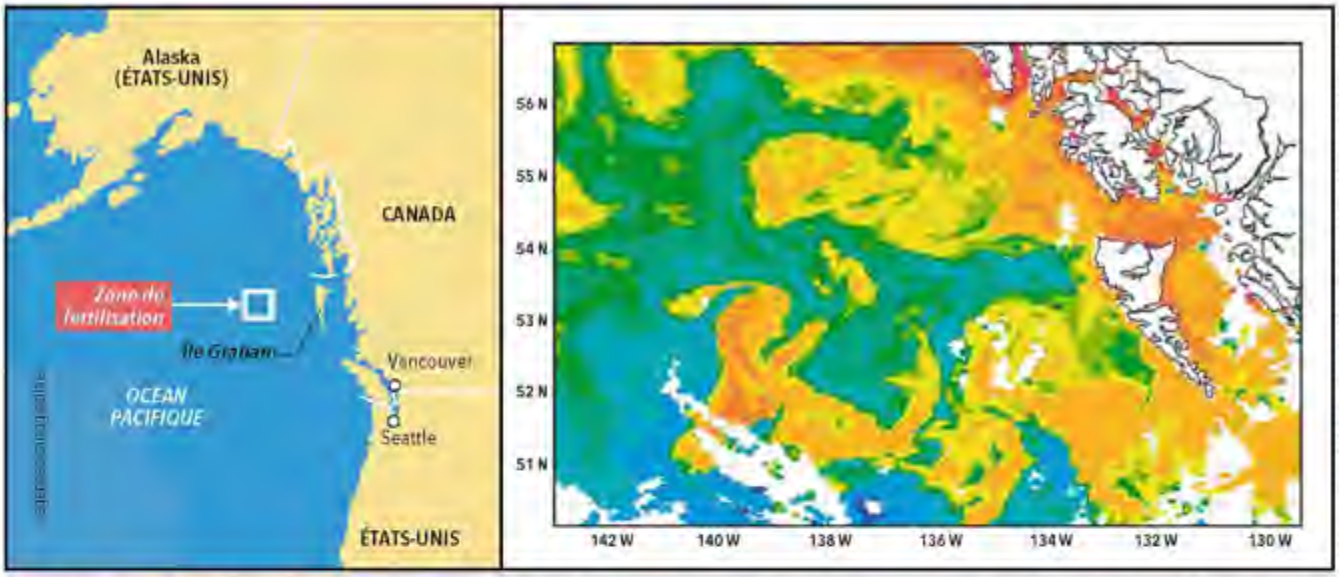
L'opération s'est déroulée en toute discrétion en juillet dernier. Un chalutier affrété par la société privée Haida Salmon Restoration Corp. (HSRC) a, tout bonnement, déversé 100 tonnes de sulfate de fer et 20 tonnes d'oxyde de fer dans le nord-est de l'océan Pacifique, à environ 300 kilomètres au large des côtes de la Colombie-Britannique, au Canada. L'objectif ? Enrichir en fer une zone d'environ 10 000 kilomètres carrés pour stimuler le développement de phytoplancton. Officiellement, il s'agissait, en jouant sur ce maillon de la chaîne alimentaire, de restaurer, *in fine*, les populations déclinantes de saumons rouges pour le compte de communautés de pêcheurs vivant sur l'archipel canadien Haida Gwaii. En réalité, l'opération visait à séquestrer au fond de l'océan du dioxyde de carbone, l'un des principaux gaz à effet de serre responsable du changement climatique pour monnayer les « crédits carbone » auxquels la séquestration peut donner droit.

L'affaire n'a été révélée que trois mois plus tard. Et ce, grâce au travail d'ECT Group, organisation internationale engagée dans le suivi du développement des nouvelles technologies, basée au Canada. Jim Thomas, l'un de ses membres, raconte : « *Au début octobre, lors de la réunion de la Convention sur la biodiversité à Hyderabad, en Inde, des premiers bruits ont circulé. Selon cette rumeur, une vaste opération de géo-ingénierie* avait été menée au large des côtes canadiennes, et ce, sans aucune autorisation. Nous avons immédiatement pris contact avec le chef de la Nation Haida, qui a confirmé la rumeur.* » Dans la foulée, le journal britannique *The Guardian* a mené une enquête et révélé l'imposture le 15 octobre [1].

Homme d'affaires récidiviste. Que sait-on ? À l'origine du projet se trouve Russ George, homme d'affaires californien bien connu de la communauté scientifique. Et pour cause, il n'en est pas à sa première tentative. En 2005, il avait créé la société Planktos, dont la mission était déjà de réaliser des fertilisations artificielles de l'océan pour vendre des

John Disney (de face), président de la société HSRC à l'origine du projet de fertilisation, est entouré de membres du conseil du village Old Masset, de l'île Graham, au Canada, lors d'une conférence de presse à Vancouver en octobre. Au premier plan, un instrument utilisé pour la fertilisation.

© ANDY CLARK/REUTERS



© GIOVANNI/GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER/NASA

L'opération de fertilisation a été menée en juillet 2012 au large de l'archipel canadien Haida Gwaii, dont fait partie l'île Graham. Après l'enrichissement en fer de l'océan, des concentrations plus élevées de chlorophylle ont été observées dans cette zone par satellite. Elles apparaissent sur l'image de droite dans les tons jaune et orange.

crédits carbone. Mais l'aventure avait tourné court. En 2007, sous la pression des organisations non-gouvernementales environnementalistes, les autorités équatoriennes et panaméennes lui interdisaient d'ensemencer l'océan Pacifique à proximité des îles Galápagos. L'année suivante, Russ George était à nouveau stoppé dans ses projets alors qu'il s'apprêtait à récidiver dans l'Atlantique. En 2009, incapable de trouver de nouveaux financements, Planktos déposait finalement le bilan.

Chat échaudé craint l'eau froide, dit un vieux proverbe. En 2011, c'est donc plus masqué que Russ George avance pour mener à bien son nouveau projet. Il crée avec un compère, John Disney, une nouvelle société, la HSRC, une « compagnie de recherche et développement spécialisée en biotechnologies marines » [2]. John Disney en est le président, Russ George n'apparaît que comme conseiller scientifique.

Pour « vendre » leur « projet de restauration des populations de saumon rouge » au conseil du village Old Masset, sur l'île Graham, ils s'appuient sur une observation réalisée en 2008, mais largement controversée : cette année-là, les populations de saumon d'Alaska auraient bénéficié des floraisons de phytoplancton provoquées par des cendres volcaniques riches en fer [3]. Après plusieurs réunions, en février 2011, le conseil des pêcheurs Haida d'Old Masset vote en faveur du « projet de mise en valeur du saumon » [4]. La communauté emprunte alors 2,5 millions de dollars pour financer le projet, qu'elle espère récupérer grâce à la vente de crédits carbone. Ce qui paraît, d'avance, bien illusoire.

Traités violés. En premier lieu, l'opération viole les traités onusiens. Hormis les expériences scientifiques menées sous un contrôle strict, les résolutions de 2008 et 2010 de la Convention et du protocole de Londres sur « la prévention de la pollution des mers par immersion de déchets ou d'autres matières » interdisent en effet les fertilisations artificielles de l'océan. En outre, l'initiative de Russ George contrevient aussi au moratoire adopté lors du sommet de Nagoya, en 2010, de la Convention sur la biodiversité. Ce moratoire proscrit les projets industriels et commerciaux de fertilisation artificielle des océans à grande échelle, jusqu'à ce que les scientifiques évaluent les risques et les bénéfices de la technique.

En outre, les deux protagonistes ont exagéré les bénéfices éventuels. Comme l'explique Stéphane Blain, du laboratoire d'océanographie microbienne de Banyuls-sur-Mer : « *Treize expériences scientifiques de fertilisation ont été réalisées entre 1993 et 2009. Une seule a montré que l'ajout de fer pouvait, dans des conditions très particulières (la fertilisation a été faite dans un tourbillon, donc une structure quasi fermée), augmenter la quantité de carbone séquestrée au fond de l'océan* [5]. *Au vu de ces maigres résultats, l'initiative menée dans le Pacifique n'a donc guère de sens.* » Et, poursuit-il, « *le véritable problème est que Russ George a agi sans en avertir quiconque et sans aucun contrôle* ». Dans un cadre scientifique, ce type d'expérience doit en effet s'accompagner de mesures précises >>>

* **LA GÉO-INGÉNIERIE** consiste à manipuler l'environnement sur une grande échelle pour atténuer le réchauffement climatique.

L'essentiel

> **UN CHALUTIER** a déversé 100 tonnes de sulfates de fer et 20 tonnes d'oxyde de fer au large des côtes canadiennes.

> **L'OBJECTIF AFFICHÉ** par la société à l'origine de l'opération était d'aider à la restauration des populations de saumons.

> **COMMERCIALEMENT PARLANT,** il s'agissait de s'octroyer des crédits carbone à bon compte.

Une « fertilisation » illégale de l'océan sème le trouble

© THOR SWIFT/THE NEW YORK TIMES/REA

Homme d'affaires américain, Russ George multiplie les projets d'enrichissement en fer de l'océan pour séquestrer du dioxyde de carbone et monnayer des crédits carbone.

>>> avant l'opération pour connaître l'état initial de l'océan. Sans cela, on ne peut ni contrôler les effets de l'ensemencement ni vérifier l'efficacité réelle du puits de carbone, et encore moins détecter d'éventuels effets secondaires (lire « De la fertilisation des océans à la séquestration du carbone », ci-dessous).

Interrogé par *The Guardian*, Russ George affirme que des scientifiques sont impliqués dans le projet depuis le début et qu'ils ont procédé à une multitude d'analyses. Tout en se refusant à les nommer ou à divulguer les données accumulées. Ce qui fait douter Stéphane Blain : « *La communauté scientifique travaillant sur cette thématique est restreinte, et l'on se connaît tous. Or, aucun d'entre nous n'a été consulté.* »

Vigilance insuffisante. Tout se résume alors à une question : comment un homme avec un tel passif a-t-il pu mener une opération de cette ampleur à l'insu de tous ? « *Russ George a menti par omission* », estime l'océanographe. Et, en premier lieu, aux communautés Haida elles-mêmes. La NASA et la NOAA, auxquelles la HSRC a emprunté des instruments de mesure, ne semblent pas plus avoir été informées du véritable objet du projet.

Restent les autorités canadiennes. Selon Russ George et John Disney, sept agences fédérales canadiennes ont été mises au courant. Environnement Canada, l'autorité nationale chargée de la protection de l'environnement, reconnaît les avoir rencontrés le 7 mai 2012. Céline Tremblay, leur porte-parole, précise la situation : « *Nos agents les ont informés que la loi canadienne sur la protection de l'environnement de 1999 interdit la fertilisation des océans. Une fiche d'information portant sur cette technique leur a été remise. Par la suite, nous n'avons reçu aucune demande d'autorisation. Mais, informée d'un possible incident le 29 août, la direction générale de l'application de la loi d'environnement Canada a lancé une enquête le lendemain.* »

L'enquête est en cours. Mais le manque de vigilance des autorités canadiennes peut surprendre. Faut-il y voir un lien avec la récente prise de position du Canada en faveur d'un assouplissement du moratoire sur la géo-ingénierie, lors de la dernière conférence des parties à la Convention sur la biodiversité ?

Quoi qu'il en soit, il paraît urgent d'établir un cadre réglementaire international et un mécanisme d'encadrement et de surveillance des opérations de géo-ingénierie pour éviter que n'importe quel apprenti sorcier ne sévisse à nouveau. « *Il est facile de réaliser une fertilisation. Il suffit d'un bateau et de sulfate de fer, composé utilisé en agriculture très facile à trouver*, prévient Stéphane Blain. *Ce qui vient de se passer montre que nous n'avons pas les outils nécessaires pour réglementer la mise en œuvre des techniques de géo-ingénierie.* »

Pourtant, la réglementation espérée pourrait se faire attendre, car le sujet divise. Pour preuve, les discussions animées qui ont émaillé la réunion annuelle des parties signataires de la Convention et du protocole de Londres, qui s'est tenue fin octobre 2012 dans la capitale britannique. Selon Léa Gérard, du ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie qui a participé à la réunion, il n'existe pas de consensus à l'heure actuelle.

« *Doit-on durcir le moratoire ? Réglementer uniquement la fertilisation ou l'ensemble des technologies de géo-ingénierie ? Les pays signataires n'ont pas réussi à se mettre d'accord. Et de nouvelles propositions seront faites fin 2013, lors de la prochaine réunion annuelle des parties contractantes.* » explique-t-elle.

En attendant, Russ George et John Disney parlent d'un « *formidable succès* ». De fait, une floraison de phytoplancton a été repérée par les satellites dans les semaines qui ont suivi l'ensemencement. « *Elle a disparu un mois plus tard. En ce qui concerne les saumons, il faudra attendre au moins deux ans avant d'enregistrer un éventuel effet, lequel sera de toute façon quasi impossible à prouver en l'absence de mesures* », tempère Stéphane Blain. Quant aux communautés Haida, l'opération les a endettées pour de longues années. ■

[1] http://tinyurl.com/cote-canadienne-geo-ingenierie
[2] www.hsrc1.com
[3] N. Jones, http://tinyurl.com/volcan-saumon, 2010.
[4] http://tinyurl.com/pecheur-haida
[5] V. Smetacek et al., *Nature*, 487, 313, 2012.

De la fertilisation des océans à la séquestration du carbone

L'ajout de fer dans l'océan stimule la croissance de phytoplancton, lequel consomme du dioxyde de carbone (CO_2) pour synthétiser les molécules dont il a besoin. D'après les treize expériences scientifiques menées jusqu'à présent, les eaux de surface absorbent du CO_2. Mais est-il exporté vers le fond des océans avec les cadavres des micro-organismes et en quelle quantité ? Seule l'expérience Eifex, acronyme anglais d'expérience européenne de fertilisation par le fer, menée en 2004 dans l'océan Austral semble le confirmer. « *L'efficacité de cette pompe biologique artificielle est à prouver* », estime Stéphane Blain, de l'université Paris 6. En outre, les effets secondaires d'une fertilisation à grande échelle sont méconnus. La décomposition de cette matière organique absorbe de l'oxygène, ce qui pourrait générer un phénomène d'anoxie néfaste à la vie marine, ou accroître l'émission d'oxyde nitreux, autre gaz à effet de serre.

ORDRE DE MALTE FRANCE

☐ **Oui,** je souhaite soutenir les actions de l'Ordre de Malte France

Je fais un don de :

☐ 20 € ☐ 30 € ☐ 50 € ☐ Autre montant ..... €

☐ Par chèque bancaire à l'ordre de « Ordre de Malte France »

75 %* DE VOTRE DON DÉDUCTIBLES SI VOUS ÊTES IMPOSABLE SUR LE REVENU

> vous recevrez un reçu fiscal

* Jusqu'à 521 € et 66 % au-delà, dans la limite de 20 % de votre revenu imposable.

☐ Mme ☐ Melle ☐ M.

ML13P

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Conformément à la loi du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification et d'opposition aux informations vous concernant en écrivant à l'Ordre de Malte France. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. Si vous ne le souhaitez pas, vous pouvez cocher la case ci-contre ☐.

Merci de compléter et renvoyer ce coupon à :
Ordre de Malte France - 59789 Lille Cedex 9

Ordre de Malte France, une force au service du plus faible

En bref

UN SATELLITE EUROPÉEN POUR LES SUPERTERRES

L'Agence spatiale européenne a sélectionné ce qui constitue sa première mission dédiée uniquement à l'étude des exoplanètes. Le satellite Cheops, de 200 kilogrammes et doté d'un télescope, sera lancé en 2017. Il observera quelque 500 étoiles accompagnées par des superterres, exoplanètes pesant plusieurs fois la masse de la Terre. Cette fois, il s'agira de déterminer le diamètre de ces planètes en mesurant précisément la baisse de luminosité lorsqu'elles passent devant leur étoile. Avec ces deux paramètres, les astronomes pourront alors connaître la densité des exoplanètes, et donc déduire leur composition interne.

PLANÈTE ERRANTE

Une planète sans étoile, errant dans l'espace à seulement 100 années-lumière de la Terre, vient d'être découverte par une équipe composée notamment d'astronomes français. C'est l'objet de ce type le plus proche jamais détecté. Grâce à sa proximité, sa masse (de 4 à 7 fois celle de Jupiter) a pu être estimée, ainsi que sa température (400 °C) et la composition de son atmosphère. D'autres candidates au titre de planètes errantes ont été découvertes. Mais sans pouvoir déterminer leur masse avec précision, il était impossible de dire s'il s'agissait de planètes ou de naines brunes, étoiles avortées de plus de 13 fois la masse de Jupiter.

P. Delorme *et al.*, *A&A*, 548, A26, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/video-nuit-noire

Pourquoi la nuit est-elle noire ? Une question expliquée de façon animée et en moins de 4 minutes par un étudiant américain, fondateur du site Minute Physics. En anglais, sous-titré en français.

Une Terre ultrarapide explique l'origine de la Lune

PLANÉTOLOGIE

Il y a 4,5 milliards d'années, la Terre tournait sur elle-même en seulement 2,5 heures, selon des astronomes américains qui, grâce à ce nouvel élément, expliquent enfin la composition de la Lune.

Pour les astronomes, l'affaire est entendue : la Lune a été créée voici environ 4,5 milliards d'années à la suite d'un impact géant entre la jeune Terre et une plus petite planète. Mais jusqu'à présent, ce scénario n'expliquait pas pourquoi la composition des roches lunaires est quasi identique à celle des roches terrestres. Des chercheurs viennent enfin d'y parvenir, en ajoutant un ingrédient supplémentaire : la Terre tout juste formée tournait sur elle-même bien plus vite que ce qu'on pensait possible [1].

Si elle fait aujourd'hui l'unanimité, l'hypothèse de la collision géante pose un problème : jusqu'alors, dans toutes les simulations, les débris éjectés à la suite du choc et qui vont donner naissance à notre satellite proviennent essentiellement de la petite planète qui a percuté la Terre. « *Or, les analyses des roches lunaires et terrestres réalisées ces dix dernières années attestent que leur composition, notamment dans les différentes formes d'oxygène, est identique. Cela laisse penser que les deux corps se sont formés à partir du même matériel* », précise Bernard Bourdon, du laboratoire de géologie de l'ENS de Lyon.

Pour mettre fin à cette contradiction, Matija Cuk, du SETI Institute, en Californie, et sa collègue Sarah Stewart, de l'université Harvard, aux

© H. BOFFIN/ESO

zoom Une nébuleuse planétaire sculptée par des naines blanches

Quelle est l'origine de cette surprenante structure en forme de S autour de la nébuleuse planétaire Fleming 1 ? En observant en détail le centre de la nébuleuse grâce au télescope VLT installé au Chili, une équipe d'astronomes y a découvert la présence d'un couple de naines blanches en orbite très serrée – d'une période de moins de 2 jours – l'une autour de l'autre. Une naine blanche est le reste d'une étoile morte qui a éjecté toutes ses couches de matière autour d'elle, cette gigantesque enveloppe de gaz constituant ce qu'on appelle la nébuleuse planétaire. Selon les chercheurs, l'interaction entre les deux astres extrêmement proches aurait entraîné la formation de deux jets de matière symétriques. Ces derniers auraient ainsi sculpté la nébuleuse pour lui donner cette forme étonnante. H. Boffin *et al.*, *Science*, 338, 773, 2012.

Dans cette simulation, la Terre (en vert, avec son noyau en bleu) est percutée par un objet vingt fois moins massif. Le choc éjecte essentiellement du matériau terrestre qui forme un disque dans lequel va naître la Lune.

© SARAH T. STEWART HARVARD UNIVERSITY/MATIJA ĆUK, SETI INSTITUTE

États-Unis, ont imaginé qu'au moment du choc la jeune Terre tournait sur elle-même bien plus vite que ce que les astronomes prévoyaient jusqu'ici. Dans leur modèle, la période de rotation est de 2,5 heures seulement – au-dessous de 2 heures, la force centrifuge la ferait éclater. À une pareille vitesse, la Terre est totalement déformée, prenant la forme d'un ellipsoïde très aplati. Une collision, même avec un petit objet, suffit alors à éjecter du matériau provenant cette fois essentiellement de la Terre, le bolide étant lui absorbé par notre planète.

Marée lunaire. Les modèles précédents n'envisageaient pas que la Terre puisse tourner sur elle-même en moins de 5 heures au moment de la formation de la Lune. Cette période de rotation était fondée sur le fait que la Terre a ralenti sous l'action des forces de marée lunaire et que le satellite s'est éloigné de la Terre dans le même temps. Cela avait permis de calculer la durée d'un jour au moment de l'impact, à partir de la durée du jour terrestre actuel de 24 heures.

Or un autre mécanisme que celui des marées lunaires est capable lui aussi de ralentir notre planète. *« D'après les deux astronomes, on aurait sous-estimé un phénomène déjà connu et présent après l'impact : les forces de marée du Soleil sur la Lune. Ces dernières auraient freiné la Terre de manière très efficace »*, explique Willy Benz, de l'institut de physique de l'université de Berne, en Suisse. Le calcul des astronomes se tient alors : en partant d'une vitesse de rotation de 2,5 heures lors de la collision et en tenant compte de ces différentes forces, on aboutit à la période actuelle de 24 heures. Et à une Lune d'une composition proche de celle de la Terre !

Le nouveau modèle met-il ainsi un point final au débat sur la formation de la Lune ? *« Il ne clôt pas les discussions,* juge Willy Benz. *Mais le fait de permettre à la Terre de tourner plus vite à ses débuts nous aidera à explorer des idées qu'on ne s'autorisait pas jusqu'ici. »* ■

Julien Bourdet

[1] M. Ćuk *et al.*, *Science*, doi:10.1126/science.1225542, 2012.

FORMATION *La lente évolution des galaxies spirales*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Françoise Combes est spécialiste de la formation et de l'évolution des galaxies à l'Observatoire de Paris.

Des astronomes ont découvert que les galaxies spirales n'ont pas toujours possédé leur forme de disque actuelle. Comment sont-ils arrivés à cette conclusion ?

F.C. L'équipe de Susan Kassin, de la NASA, a observé, avec le télescope Keck, à Hawaï, plus de 540 galaxies situées entre 8 et 2 milliards d'années-lumière de la Terre. L'analyse de leur spectre lumineux, qui trahit le mouvement des étoiles et du gaz, a révélé que les galaxies les plus lointaines étaient désordonnées : les étoiles y bougent dans tous les sens. En observant des galaxies de plus en plus proches dans l'espace, et donc dans le temps, les chercheurs ont vu ces mouvements aléatoires diminuer : les étoiles finissent par s'organiser en un disque en rotation autour du centre de la galaxie [1]. Ces travaux montrent que les galaxies spirales acquièrent leur forme définitive en plusieurs milliards d'années. On le soupçonnait déjà sur quelques cas isolés, mais c'est la première fois qu'une étude statistique en apporte la preuve définitive.

Comment expliquer ces observations ?

F.C. Il y a 8 milliards d'années, les collisions et les fusions entre galaxies étaient extrêmement fréquentes, comme en attestent de nombreuses observations. Ces événements violents ont semé le chaos à l'intérieur des galaxies, déstabilisant les étoiles et la matière qui s'y trouvaient. En outre, à cette époque, les galaxies étaient alimentées en grande quantité en gaz par le milieu intergalactique, comme le suggèrent les modèles. Un processus qui a créé beaucoup de turbulence, dispersant ainsi les étoiles dans toute la galaxie. Mais, avec le temps, ces phénomènes se sont énormément ralentis. Si bien que le gaz et les nouvelles étoiles qui se forment en son sein ont pu s'ordonner dans un disque.

Y a-t-il des différences entre les galaxies ?

F.C. Oui. Si toutes les galaxies finissent par former un disque, les chercheurs ont montré que, pour les plus petites, cette évolution est plus lente. Ainsi, pour les galaxies de taille comparable à la nôtre, la totalité d'entre elles formaient un disque bien régulier il y a 2 milliards d'années. Contre la moitié seulement pour les galaxies dont la masse représente 3 % de celle de la Voie lactée. Ce constat va dans le sens d'une autre découverte : les galaxies les plus petites forment actuellement beaucoup d'étoiles, alors que les plus grosses ont presque arrêté d'être actives. Sans que l'on comprenne bien pourquoi, les petites galaxies évoluent donc plus doucement que les autres. Ces travaux pourraient permettre de progresser sur cette question. ■ **Propos recueillis par J.B.**

[1] S. Kassin *et al.*, *ApJ. 758*, 106, 2012.

En bref

VOIR EN MILIEU OPAQUE

Observer un objet situé dans un milieu qui diffuse la lumière requiert l'utilisation d'une source lumineuse placée derrière l'objet. Pour la première fois, des physiciens ont élaboré une technique qui se passe d'une telle source. Ils ont placé un objet fluorescent de 50 micromètres de large à 6 millimètres derrière un écran en verre dépoli de quelques micromètres d'épaisseur. Puis ils ont éclairé l'écran par-devant avec un laser, en faisant varier l'angle d'incidence. En mesurant la fluorescence générée par l'objet en fonction de l'angle d'illumination, ils ont calculé l'indice moyen selon lequel l'écran diffuse la lumière. Ils ont pu ainsi reconstituer la forme de l'objet dissimulé.

J. Bertolotti *et al.*, *Nature*, 491, 232, 2012.

GRAPHÈNE SEMI-CONDUCTEUR

Des physiciens français et américains ont conçu une nouvelle technique pour produire des bandes semi-conductrices à base de graphène. Jusqu'alors, le processus pour y parvenir était long et difficile, et il altérait le graphène. Cette fois, les physiciens ont utilisé du carbure de silicium, matériau lui-même semi-conducteur, sur lequel ils ont gravé des nanosillons à l'aide d'un faisceau d'électrons. Ils y ont déposé du graphène, et ont chauffé le tout : le graphène s'est mélangé avec le carbure de silicium sans perdre sa structure atomique. La méthode est facilement reproductible, puisque les chercheurs ont produit des dizaines de milliers de bandes.

J. Hicks *et al.*, *Nature Physics*, sous presse, 2012.

sur le web

www.mediachimie.org

Pour découvrir l'histoire de la chimie française, ses domaines de recherche, ses métiers, etc.

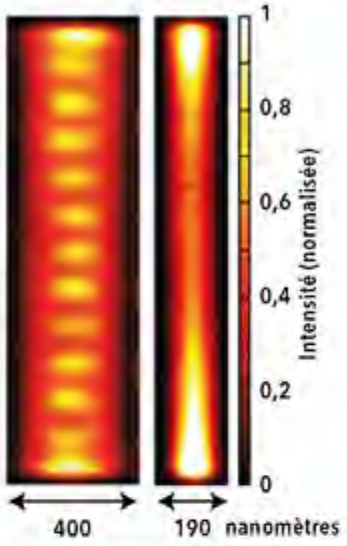
Obtenir un indice de réfraction

OPTIQUE

Des physiciens ont mis au point pour la première fois un dispositif avec un indice de réfraction nul, qui permet à la lumière visible d'atteindre une vitesse de phase infinie.

Et si, contrairement à ce qu'énonce la théorie de la relativité restreinte, la lumière avait une vitesse infinie ? Depuis 1905, on sait que la lumière atteint sa vitesse maximale dans le vide. Dans tous les autres milieux, comme l'eau ou le verre, sa progression est ralentie par l'interaction avec la matière. Les physiciens mesurent ce ralentissement à l'aide de l'indice de réfraction du milieu. D'ordinaire, celui-ci est supérieur à un. Or, Nader Engheta, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, Albert Polman, de l'institut de recherche fondamentale sur la matière d'Amsterdam, aux Pays-Bas, et leurs équipes viennent de mettre au point, pour la première fois, un dispositif dont l'indice de réfraction est égal à zéro. Autrement dit, la lumière visible s'y propage à une vitesse infinie [1].

Pour obtenir ce résultat, les physiciens ont travaillé à l'échelle du nanomètre. Leur dispositif se compose d'une barre rectangulaire de silice, matériau isolant et transparent. Cette barre, de 85 nanomètres d'épaisseur et de 2 000 nanomètres de long,



© AMOLF AND UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

À gauche, dans une barre de silice de 400 nanomètres de largeur, le faisceau d'électrons crée une alternance de zones d'ombre et de lumière. Alors qu'à droite, pour une largeur de 190 nanomètres, le même faisceau semble illuminer la barre en continu.

MOLÉCULES *Une enzyme contrôlée par de*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Damien Baigl, professeur de chimie à l'université Pierre-et-Marie-Curie, dirige une équipe de recherche au département de chimie de l'École normale supérieure à Paris.

Vous avez mis au point une structure associant de longues molécules d'ADN à une enzyme. Quelles sont ses propriétés ?

D.B. Nous avons attaché quatre brins d'ADN à une enzyme d'origine bactérienne, la bêta-lactamase, qui décompose des molécules présentes surtout dans les antibiotiques. Et nous avons découvert que, dans cette structure en étoile, l'enzyme agit plus rapidement [1].
Les enzymes sont des protéines, et, en biotechnologie, l'association d'ADN à une protéine est un procédé courant : cela peut par exemple l'aider à identifier une cible. Mais les brins d'ADN utilisés dans ce but sont très courts : ils contiennent au maximum quelques dizaines de paires de nucléotides, unité élémentaire de l'ADN.
Et ils n'ont aucune influence sur l'activité de la protéine.
Pour l'expérience, nous avons utilisé des molécules d'ADN possédant 48 000 paires de nucléotides, ce qui n'avait jamais été fait.

Vous attendiez-vous à ce résultat ?

D.B. Pas du tout, nous imaginions au contraire que ces longs bras d'ADN gêneraient le contact entre l'enzyme et les molécules qu'elle transforme, empêchant ainsi la réaction chimique de se produire. Nous voulions vérifier que l'influence des bras d'ADN diminue lorsque ceux-ci sont compactés, repliés sur eux-mêmes. C'est bien le cas, sauf que ces bras, lorsqu'ils sont déplié, augmentent l'activité enzymatique au lieu de la réduire ! Nous ne savons pas encore l'expliquer. De nombreux paramètres peuvent influencer

égal à zéro

est enveloppée d'une couche d'argent conducteur.

Les physiciens ont fait passer un faisceau d'électrons à l'intérieur de ce dispositif pour produire de la lumière visible. En modulant sa puissance, ils ont réussi à obtenir de la lumière dans toutes les longueurs d'onde visibles. Puis ils ont observé le comportement de ces ondes lumineuses en fonction de la largeur de la barre de silice, qu'ils ont fait varier entre 120 et 400 nanomètres.

Illumination continue. Pour chaque longueur d'onde, les physiciens ont alors remarqué que, quand la barre de silice a une certaine largeur, les ondes qui la traversent semblent illuminer le milieu en continu. D'ordinaire, elles se chevauchent et créent des bandes de lumière et des bandes d'obscurité. *« Pour les grandes longueurs d'onde, comme le rouge (de 620 à 780 nanomètres) ou l'orange (de 592 à 620 nanomètres), ce phénomène se produit quand la barre de silice mesure 190 nanomètres de large,* détaille Luc Thévenaz, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse. *La lumière semble alors osciller de manière synchrone tout le long du matériau, comme si les pics des ondes, au lieu de survenir à intervalle régulier, se déplaçaient à une vitesse infinie, et partout à la fois. »*

Pour autant, pas question de remettre en cause la relativité restreinte d'Einstein. *« Comme le soulignent les auteurs eux-mêmes, dans leur expérience, cette vitesse infinie ne concerne que la vitesse de phase, c'est-à-dire la vitesse de déplacement des oscillations de l'onde »,* explique Luc Thévenaz. Les ondes électromagnétiques possèdent effectivement deux vitesses. La vitesse de phase permet de définir la fréquence des oscillations d'une onde.

Vitesse de groupe. L'autre vitesse, c'est la vitesse de groupe : elle correspond à la vitesse à laquelle un paquet d'ondes se propagent et transportent de l'information. Or, dans cette expérience, la vitesse de groupe reste inférieure à celle de la lumière dans le vide. *« Ce résultat n'en est pas moins une très jolie première,* reprend Luc Thévenaz. *Il faut maintenant vérifier si l'on obtient les mêmes effets avec des structures de plus grande échelle, car on sait qu'il est plus facile d'obtenir des effets renforcés sur un petit objet. »* ■ **Vincent Glavieux**

[1] E.J.R. Vesseur *et al., Phys. Rev. Lett.*, sous presse, 2012.

l'ADN

cette activité, comme l'acidité ou la température. Certains solvants peuvent accélérer l'activité des enzymes, mais ce phénomène n'avait jamais été observé lors d'une association avec une autre molécule. Peut-être la structure des zones actives de l'enzyme a-t-elle été modifiée par notre manipulation ?

Ce résultat pourrait-il s'appliquer à d'autres protéines ?

D.B. Nous savons qu'il ne dépend pas de l'enzyme choisie. Nous avons reproduit l'expérience, avec le même résultat, pour une autre enzyme dont la fonction biologique est très différente. Nous espérons pouvoir l'appliquer à d'autres types de protéines, comme des anticorps. Pouvoir déclencher à volonté la fonction de différentes protéines serait extrêmement intéressant, par exemple pour activer *in situ* la transformation de molécules en médicaments. Nos prochains travaux consisteront à essayer de contrôler l'activité enzymatique par un stimulus lumineux. Nous avons en effet mis au point une méthode permettant de contrôler la compaction des bras d'ADN par la lumière. Nous appliquerons ce principe à notre structure en étoile. ■ **Propos recueillis par Antoine Cappelle**

[1] S. Rudiuk *et al., Angew. Chem. Int. Ed.*, sous presse, 2012.

© PHOTO COURTESY OF MIKHAIL KATS, ROMAIN BLANCHARD AND PATRICE GENEVET

zoom

Un nouveau type de revêtement optique

Ces objets de différentes couleurs sont des échantillons d'or recouverts d'un nouveau type de revêtement optique : contrairement au film classique, réfléchissant, celui-ci est fabriqué à partir d'un matériau opaque, du germanium. En créant un film dont l'épaisseur est de l'ordre du nanomètre, des physiciens de l'université Harvard, aux États-Unis, ont réussi à faire en sorte que le germanium réfléchisse la lumière. En ajoutant ou en enlevant quelques nanomètres d'épaisseur, ils contrôlent même les longueurs d'onde reflétées : à 7 nanomètres, le film reflète le rose ; à 11 nanomètres, il reflète le violet, etc.

M. Kats et al., Nature Materials, sous presse, 2012.

En bref

MOINS DE NEIGE

La banquise qui recouvre l'océan Arctique n'est pas la seule à souffrir du changement climatique. Depuis 1979, l'étendue du manteau neigeux qui tapisse les terres de l'hémisphère Nord en juin, à la fin du printemps, a diminué de 17,8 % par décennie, affirment deux géologues canadiens après avoir analysé les images satellitaires et les données collectées *in situ*. Un recul plus rapide que ne le prévoyaient les modèles du climat et qui semble s'accélérer depuis le début des années 2000.

C. Derksen et R. Brown, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19504, 2012.

GAZ À EFFET DE SERRE ET AGRICULTURE

L'agriculture mondiale, depuis la production des fertilisants jusqu'à l'emballage des denrées alimentaires, la production agricole, le stockage et la réfrigération, émet chaque année de 9 800 à 16 900 millions de tonnes d'équivalent carbone. Soit près du tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'origine humaine. À elle seule, la production agricole (y compris les émissions indirectes liées au changement d'utilisation des sols et à la déforestation) contribue pour plus de 80 % de ces émissions. Cette estimation faite par une équipe internationale est la plus précise à ce jour, les études précédentes ne portant que sur la contribution de la production agricole.

S. J. Vermeulen et al., *Annual Review of Environment and Resources*, 3, 195, 2012.

sur le web

www.studentclimates.org

Le réseau CliMates réunit des étudiants de différents pays désireux de promouvoir des solutions innovantes pour lutter contre le changement climatique et mobiliser la société civile.

SISMOLOGIE *Des activités humaines à l'origine du séisme de Lorca*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Jean-Robert Grasso est sismologue et responsable de l'Observatoire multidisciplinaire des instabilités de versants, à l'institut des sciences de la Terre de Grenoble.

Le séisme de magnitude 5,1 qui a fait d'énormes dégâts dans la ville de Lorca, en Espagne, le 11 mai 2011, aurait été déclenché par la baisse rapide du niveau d'une nappe phréatique [1]. Qu'en pensez-vous ?

J.-P.G. On sait effectivement que certaines activités humaines sont susceptibles de provoquer un séisme : le remplissage ou la vidange d'un lac de barrage, l'injection d'eau dans le sous-sol pour la géothermie ou la fracturation hydraulique destinée à extraire les gaz de schiste. Cette fois-ci, Pablo Gonzalez, de l'université de l'Ontario occidental, au Canada, et ses collègues ont analysé les déformations du sol avant, durant et après le séisme de Lorca. Ils ont ainsi montré que le glissement qui s'est produit sur la faille Alhama de Murcia peut s'expliquer par la baisse rapide du niveau de la nappe phréatique située à proximité : celle-ci a diminué de 250 mètres entre 1960 et 2010 en raison d'un pompage massif.

Comment cette vidange a-t-elle provoqué ce séisme ?

J.-P.G. Selon leurs calculs, cette baisse a engendré des contraintes de quelques kilopascals sur la portion de faille comprise entre 2 et 4 kilomètres de profondeur, là où la rupture s'est produite. En se fondant sur la taille de la portion de faille affectée par le changement de contraintes, ces sismologues affirment aussi que la baisse du niveau de la nappe a contrôlé l'extension finale de la rupture et, donc la magnitude du séisme. Ce qui est plus discutable.

Pour quelle raison ?

J.-P.G. Pablo Gonzalez et son équipe adoptent un point de vue déterministe : selon eux, la magnitude du séisme est directement liée à l'extension de la zone où les contraintes induites par la vidange de la nappe sont maximales. Mais cela va à l'encontre des résultats acquis ces dix dernières années, qui tendent au contraire à montrer que la propagation d'une rupture le long d'une faille est un processus non linéaire et donc stochastique. Lorsqu'une cassure apparaît on ne sait pas comment elle va évoluer. Va-t-elle rester « petite » ou se propager sur de grandes distances ? La rupture progresse dans un milieu fortement hétérogène, et une multitude de petits éléments perturbateurs (variations locales des propriétés de la roche, frottements, etc.) vont faire qu'elle va grandir ou pas.

zoom Des déchets jusque dans l'océan Arctique !

Ces déchets plastiques ont été retrouvés à 2 500 mètres de profondeur dans l'océan Arctique. Selon le décompte réalisé par Melanie Bergmann et Michael Klages, de l'Institut Alfred-Wegener pour la recherche polaire et marine, à Bremerhaven, en Allemagne, leur nombre a doublé en dix ans, passant de 3 635 à 7 710 par kilomètre carré. Un chiffre comparable à celui observé dans certaines zones de l'Atlantique. Les chercheurs ont analysé quelque 2 200 photographies prises entre 2002 et 2011 dans le détroit de Fram, qui sépare le Groenland de l'archipel du Svalbard, où l'institut a installé un observatoire. La fonte de la glace de mer, qui agit comme une barrière naturelle, et la hausse du trafic maritime sont possiblement en cause.

M. Bergmann et M. Klages, *Mar. Pollut. Bull.* http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.09.018, 2012.

© ALFRED WEGENER INSTITUTE

Ainsi, la baisse du niveau de la nappe phréatique est le déclencheur du séisme, mais il est impossible en l'état actuel de nos connaissances d'affirmer sur la base d'une seule étude que sa magnitude a été contrôlée par les contraintes imposées par les activités humaines. **Cette baisse rapide du niveau de la nappe peut-elle seule expliquer le séisme de Lorca ?**

J.-P.G. Il est vraisemblable qu'elle n'a fait que le précipiter. La croûte terrestre est en certains endroits proche de la rupture, et de légères perturbations suffisent à déclencher un séisme. L'extraction d'eau a accéléré un processus naturel, en introduisant un surplus de contraintes à celles engendrées par la poussée de l'Afrique contre l'Europe. Concrètement, elle a accentué la compression sur la faille, précipitant un séisme qui aurait eu lieu, mais pas forcément à ce moment, ni à cette profondeur. ■ **Propos recueillis par Fabienne Lemarchand**

[1] P. J. Gonzalez *et al.*, *Nature Geoscience* doi:10.1038/Ngeo1610, 2012.

Le scénario du tsunami sur le lac Léman est établi

GÉOLOGIE

En l'an 563, l'effondrement d'un pan de montagne a provoqué un tsunami dans le lac Léman. Des géologues de l'université de Genève viennent de reconstituer le déroulement de la catastrophe.

Les évêques Grégoire de Tours et Marius d'Avenches ont relaté l'événement dans leurs chroniques. En l'an 563, l'effondrement dans le Rhône d'un pan d'une montagne du diocèse du Valais a engendré une vague géante dans le lac Léman, tout proche. Celle-ci submergea les rivages, fauchant maisons, hommes et troupeaux. Des géologues de l'université de Genève, en Suisse, ont réussi à reconstituer le déroulement de cette catastrophe, encore énigmatique [1].

À l'origine, l'équipe dirigée par Stéphanie Girardclos cherchait à retracer l'histoire des crues du Rhône, en étudiant les sédiments déposés au fil des ans au fond du lac Léman dans lequel le fleuve se jette. Mais en les sondant grâce à la « sismique réflexion », technique utilisée par les pétroliers pour repérer les gisements d'hydrocarbures, les géologues ont fait une découverte inattendue : dans la région la plus profonde du lac, entre Lausanne et Évian, ils ont repéré une « lentille » de sédiments longue d'une quinzaine de kilomètres et large de 7 kilomètres, bien plus épaisse que toutes les autres. Quelque 250 millions de mètres cubes de matériel semblent s'être déposés en un temps très court.

Un tsunami s'est propagé dans le lac Léman, suite à l'effondrement du pan d'une montagne du Valais (flèche noire). La vague géante a déferlé en quelques minutes (en rouge) à partir du delta du Rhône jusqu'à Genève.

Sédiments du Rhône. L'analyse des carottes de sédiments prélevées en divers endroits montre que cette lentille sédimentaire est composée de limons et de sables issus du delta du Rhône, là où il se jette dans le lac. Surtout, les sédiments les plus grossiers (des sables d'un millimètre de diamètre environ) occupent la base de la couche, les plus fins (des argiles) étant au-dessus. Cette structure ne se retrouve nulle part ailleurs dans les carottes et indique un événement exceptionnel. En effet, le sable grossier transporté par le Rhône se dépose normalement tout de suite en arrivant dans le lac, dans la partie proximale du delta, proche de la côte.

Les datations de quelques feuilles et d'un morceau de bois par la technique du carbone 14 lui attribuent un âge entre la fin du IV[e] siècle et le début du VII[e] siècle. Les sources historiques ne mentionnant pas d'autres catastrophes, les chercheurs en déduisent que ces sédiments témoignent bel et bien du tsunami de 563.

Un scénario prend alors forme : l'écroulement du pan de montagne (sans doute une partie du Grammont dans le Chalais valaisan) s'est produit dans le delta du Rhône. Sous le choc, les sédiments meubles ont été déplacés brutalement vers le lac, ce qui a mis en mouvement les eaux. Selon les simulations numériques faites par Guy Simpson, l'effondrement du delta a généré un tsunami qui s'est propagé d'est en ouest.

Après seulement une dizaine de minutes, une vague haute de 8 mètres aurait atteint ce qui est aujourd'hui Évian-les-Bains. Quelques minutes plus tard, elle arrivait à Lausanne, sur la rive opposée, avec une hauteur évaluée à 13 mètres. Son amplitude aurait ensuite décru avant de s'amplifier de nouveau en s'engouffrant dans l'entonnoir du « Petit Lac », à la pointe ouest. En arrivant à Genève, 70 minutes après sa naissance, la vague avait 8 mètres de haut ! ■ **F.L.**

[1] K. Kremer *et al.*, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo.1618, 2012

Un théorème de théorie des groupes vérifié par ordinateur

En codant de nombreuses théories d'algèbre, des informaticiens sont parvenus à vérifier par ordinateur la démonstration d'un important théorème de théorie des groupes. Ce succès ouvre la voie à la vérification de problèmes mathématiques difficiles.

© DR

Georges Gonthier est chercheur en informatique. Partageant son temps entre le centre de recherche commun Inria-Microsoft situé à Saclay et le laboratoire de Microsoft à Cambridge, en Angleterre, il dirige l'équipe «composants mathématiques» qui vise à formaliser des théories mathématiques élaborées.

Avec l'interface graphique de Coq, l'utilisateur code dans la fenêtre de gauche une démonstration (ici le début d'un théorème sur l'existence d'une limite). Dans la fenêtre de droite s'inscrivent les étapes intermédiaires.

Pourquoi teniez-vous à vérifier le théorème de Feit-Thompson ?

G.G. Nous voulions voir si nous pouvions utiliser des assistants de preuve, systèmes qui permettent la vérification de démonstrations mathématiques, pour des théorèmes de mathématiques «sérieux». Nous avions vérifié, en 2005, le «théorème des quatre couleurs». Mais sa preuve utilisant uniquement la combinatoire, nous voulions aller plus loin et être capables de vérifier des pans entiers d'algèbre. Le théorème de Feit-Thompson, selon lequel tout groupe qui contient un nombre impair d'éléments est «résoluble», est la pierre angulaire d'un gros programme de théorie des groupes baptisé «classification des groupes finis».

Quel était le statut de ce théorème ?

G.G. Sa démonstration, publiée en 1963 par Walter Feit et John Thompson, était alors la plus longue parue. Avec ses 250 pages, c'était du jamais-vu à une époque où les preuves de théorie des groupes ne dépassaient guère 20 pages. Pendant une quinzaine d'années, du fait de cette dimension et de la difficulté à suivre le raisonnement de la preuve, des doutes ont perduré sur sa validité. Les résultats qui en découlaient étaient notés d'un astérisque, au cas où le résultat serait finalement faux...

La preuve est-elle aujourd'hui considérée comme valide ?

G.G. La dernière version de la preuve révisée a été publiée en 1995 et 2000 dans deux ouvrages. Elle est effet considérée comme validée, mais n'est guère moins longue. Si nous avons cherché à la vérifier, c'était pour nous attaquer à une preuve réputée difficile et qui faisait appel à de nombreux domaines des mathématiques. Au final, le but de l'exercice n'était pas tellement de vérifier la preuve, mais plus de comprendre comment formaliser et codifier dans un assistant de preuve toutes les théories sur lesquelles elle s'appuie. Autrement dit, l'essentiel du projet consistait à comprendre comment coder une part non négligeable de la théorie des nombres, toute

sur le web

http://tinyurl.com/microsoft-inria
Page de présentation du projet «composants mathématiques» (en anglais).

http://tinyurl.com/theorem-feit-thompson
Page qui donne, chapitre par chapitre, le codage de la preuve et montre sa vérification en direct.

Chronologie

1934 : Haskell Curry établit une première correspondance entre preuves formelles et fonctions calculables (entre preuves et programmes).
1967 : Le Néerlandais Nicolaas de Bruijn crée le langage Automath, dans lequel les énoncés mathématiques peuvent être exprimés précisément.
1972 : L'assistant de preuve automatique LCF est élaboré notamment par Robin Milner.
1984 : Gérard Huet et Thierry Coquand inventent un nouveau formalisme qui permet d'avoir calcul et démonstration sur un pied d'égalité. L'assistant Coq est fondé sur ce formalisme. Il permet de calculer des énoncés et des preuves.
1986-1998 : D'autres assistants de preuve apparaissent fondés sur LCF : Isabelle en Allemagne,

DES PROCÉDURES AUX COMPOSANTS MATHÉMATIQUES

Dans les années 1970, les informaticiens prônaient l'écriture de bibliothèques de procédures. L'idée était que, pour résoudre un nouveau problème, il suffisait de combiner des procédures de la bibliothèque. Rapidement, on s'est aperçu que cette idée ne permettait pas de résoudre des problèmes compliqués, car, pour utiliser deux procédures ensemble, il faut que les objets qu'elles manipulent soient représentés de la même manière. Or c'est rarement le cas, comme l'illustrent les différentes écritures d'une date à travers le monde (30/01/2010 ; 01/30/2010 ; 10/30/01, etc). Dès la fin des années 1980 a émergé l'idée des composants logiciels : il s'agit de programmes qui contiennent la description de la manière de les utiliser. Ce qui permet de créer des objets plus compliqués. Les composants mathématiques étendent cette organisation et devraient permettre de vérifier des problèmes mathématiques complexes en combinant des composants simples.

l'algèbre linéaire, un peu d'algèbre abstraite. Une fois codées, ces théories peuvent être réutilisées pour vérifier d'autres démonstrations, qui y feraient appel.

Comment vous y êtes-vous pris ?

G.G. Le gros du travail a été de traduire la preuve et les théories sous-jacentes en un programme vérifiable et surtout utilisable. C'est pour cela que le projet dans le cadre duquel nous avons travaillé s'appelle « composants mathématiques », car l'idée consistait à comprendre comment présenter une théorie mathématique de manière similaire à un composant logiciel (lire l'encadré, ci-dessus). Au final, la preuve codée dans un langage spécifique représente 170 000 lignes de code informatique. Sur cet ensemble, un tiers seulement consiste en la preuve elle-même, le reste étant le codage des théories sous-jacentes.

Quel assistant de preuve avez-vous utilisé ?

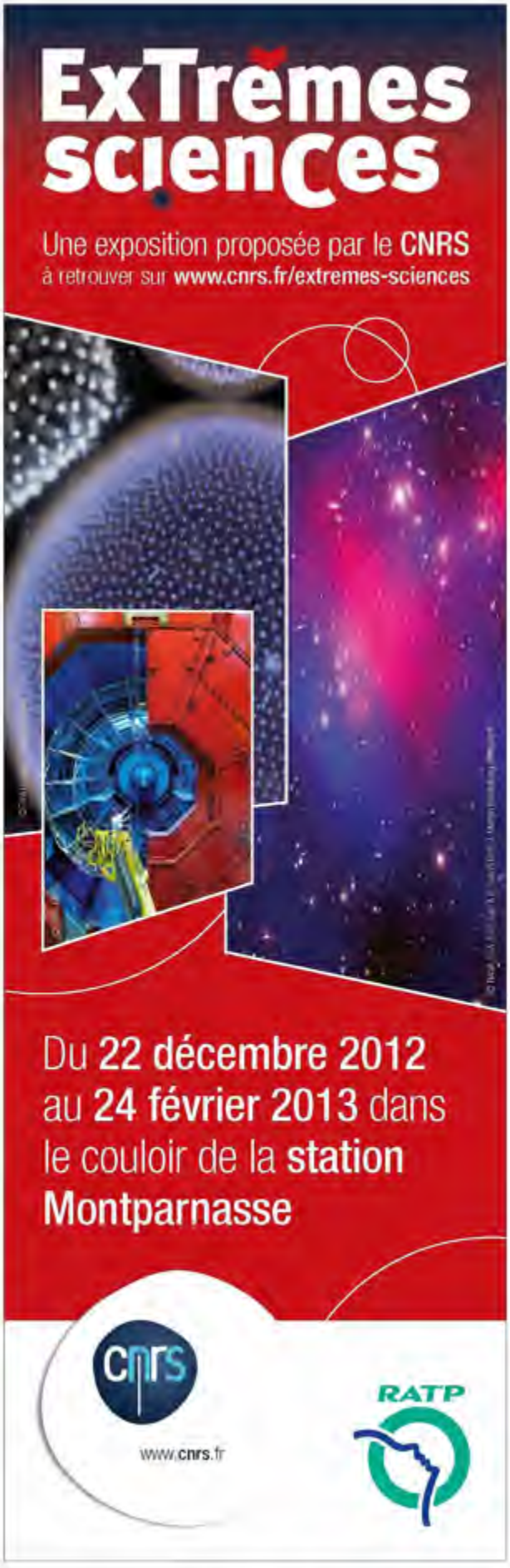
G.G. Nous avons utilisé Coq, système qui interprète le code de la preuve et vérifie sa cohérence logique. C'est déjà avec Coq qu'avait été vérifié le théorème des quatre couleurs. Son avantage sur d'autres assistants de preuve est qu'il utilise une logique très expressive, c'est-à-dire dans laquelle on peut avoir des énoncés riches de sens. Mon expérience est que pour faire de l'algèbre, notamment de la théorie des groupes, cette richesse est nécessaire ; elle permet d'extraire un maximum de sens à partir d'un minimum de symboles. Tout n'est pas encore entièrement automatisé – la part de codage de la preuve reste un gros travail –, mais le succès de notre projet montre la maturité de ces outils pour attaquer des problèmes d'algèbre réputés difficiles. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

et HOL et HOL-light en Grande-Bretagne. La logique utilisée est d'ordre supérieur (elle permet d'utiliser des variables qui se réfèrent à des fonctions ou à des prédicats).

2005 : Vérification du théorème des quatre couleurs à l'aide de Coq.

2012 : L'équipe de Georges Gonthier chez Inria et Microsoft prouve la validité du théorème de Feit-Thompson à l'aide de l'assistant de preuve Coq.



En bref

COUCOU TRAHI PAR SON CRI

Le mérion superbe, oiseau d'Australie, sait repérer les jeunes coucous nés dans son nid, et abandonne alors ce dernier. Comment reconnaît-il les intrus ? Une équipe australo-américaine vient de le découvrir, après avoir enregistré les vocalises de mérions femelles durant la nidification, dans des nids parasités ou non. Les mères émettent un signal particulier à partir du dixième jour de couvaison. Les poussins mérions, qui naissent au quinzième jour, savent reproduire ce signal. Tandis que les poussins coucous, qui naissent au douzième jour, en sont incapables. Lorsqu'un nid est piraté, la femelle mérion l'abandonne quand elle entend la « mauvaise » vocalise du jeune coucou.

D. Colombelli-Négrel *et al.*, *Curr. Biol.*, 22, 2155, 2012.

DES MAMMIFÈRES PAS SI PETITS

Les premiers mammifères placentaires étaient plus gros que les plus anciens fossiles connus, datés de 125 millions d'années, et qui ont, eux, la taille d'une musaraigne. C'est ce que suggèrent les travaux d'une équipe montpelliéraine. Chez les mammifères actuels, la composition du génome est en partie corrélée à la taille et à la longévité. D'où l'idée de comparer le génome de 36 espèces pour y retrouver des caractéristiques relatives à leur ancêtre commun. Cette analyse révèle que ledit ancêtre pesait plus d'un kilogramme et vivait environ 25 ans.

J. Romiguier *et al.*, *Mol. Biol. Evol.*, doi:10.1093/molbev/mss211, 2012.

sur le web

http://tinyurl.com/2013-quinoa

Le quinoa sera à l'honneur en 2013, déclarée par l'ONU « année internationale du quinoa ».

Des câbles électriques vivants

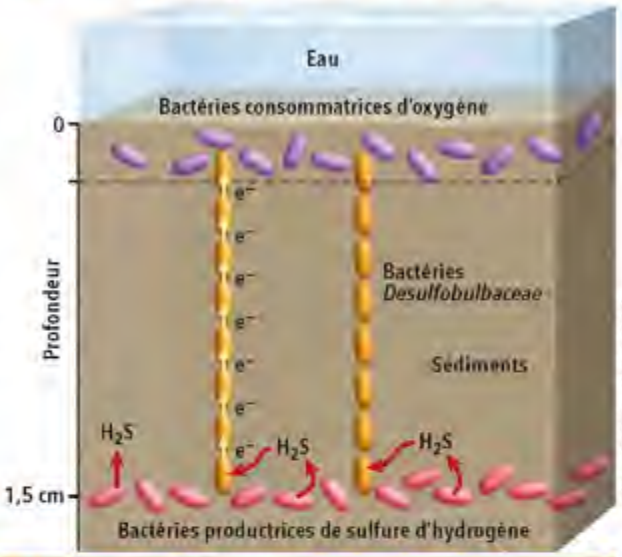
MICROBIOLOGIE

Dans les sédiments marins, certaines bactéries s'assemblent pour former des câbles assurant le passage d'un courant électrique.

En cherchant l'origine d'étranges courants électriques observés dans des sédiments marins, une équipe américano-danoise a découvert des conducteurs électriques inattendus : composés de centaines de bactéries accolées les unes derrière les autres, ils transportent des électrons vers les sédiments de surface, sur plus de 1 centimètre [1]. Une distance énorme, à l'échelle des bactéries. C'est la première fois qu'un tel mode de conduction du courant est observé.

Les sédiments marins constituent un écosystème très particulier. Les deux premiers millimètres sont oxygénés, et les bactéries qui s'y trouvent respirent en utilisant cet oxygène, auquel elles cèdent des électrons. Plus en profondeur, l'oxygène fait défaut. Les espèces bactériennes vivant à cet endroit respirent en cédant des électrons à des ions sulfates, qui sont réduits en sulfure d'hydrogène. *A priori*, il n'y a aucun rapport entre ces deux populations de bactéries.

Mais, en 2010, l'équipe menée par Nils Risgaard-Petersen, de l'université d'Aarhus, au Danemark, a fait une étrange découverte : dans les sédiments marins d'une baie voisine, quand la concentration en oxygène diminue en surface, du sulfure d'hydrogène s'accumule en profondeur. Ce phénomène laissait supposer l'existence d'un flux d'électrons entre les bactéries de surface et les autres. Et en effet, les chercheurs ont mesuré un courant électrique entre les deux couches de sédiments. Restait à trouver comment il se propageait.



©INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

Les bactéries *Desulfobulbaceae* (en orange) récupèrent des électrons en profondeur, à partir du sulfure d'hydrogène (H_2S) produit par d'autres bactéries. Elles transportent ces électrons jusqu'à la surface, où elles s'en servent pour consommer l'oxygène, comme les autres bactéries de surface.

En lavant les sédiments des deux premiers centimètres à la recherche d'éventuelles structures susceptibles de conduire le flux d'électrons, les biologistes danois ont découvert des touffes de filaments étranges. Des analyses génétiques leur ont révélé qu'ils étaient constitués de bactéries de la famille des *Desulfobulbaceae*, dont

zoom Toujours plus de plumes

Trois fossiles de dinosaures exhumés dans la province d'Alberta, au Canada, sont les premiers dinosaures à plumes découverts en Amérique du Nord. Datés de 75 millions d'années, ces spécimens de l'espèce *Ornithomimus edmontonicus*, d'environ 160 kilogrammes à l'âge adulte, comprennent un jeune et deux adultes. La comparaison entre ces trois individus révèle que le plumage évoluait au cours de la vie. Les jeunes étaient totalement recouverts d'un duvet. Chez les adultes (ci-contre, à gauche), il cédait la place à des plumes au niveau des membres antérieurs, comme l'indiquent les traces d'implantation visibles sur le cubitus et le radius (ci-contre, à droite). Ces « pattes en forme d'aile » servaient peut-être lors des parades amoureuses.

D.K. Zelenitsky *et al.*, *338*, 510, 2012.

l'examen au microscope électronique a montré qu'elles étaient *a priori* bien adaptées au transport d'électrons. Longues d'environ 5 micromètres, ces bactéries allongées présentent en effet 15 à 17 rainures longitudinales. Elles peuvent s'accoler par leurs extrémités et connecter leurs rainures. L'ensemble est enveloppé d'une membrane isolante. Le « câble » ainsi formé peut mesurer plus d'un centimètre de long, et relie la couche de sédiments de surface à celle située dessous.

Double métabolisme. D'autres expériences ont indirectement soutenu l'hypothèse d'une conduction d'électrons par ce câble. Par exemple, lorsque les sédiments sont au préalable filtrés de façon à les priver de ces bactéries, il est impossible de détecter un courant.

Selon Nils Risgaard-Petersen, les bactéries *Desulfobulbaceae* tireraient parti d'un double métabolisme : *« En profondeur, elles oxydent le sulfure d'hydrogène produit par les bactéries voisines. Ce faisant, elles récupèrent des électrons, et les véhiculent de proche en proche, jusqu'à la surface. Là, elles s'en servent pour respirer en utilisant, cette fois, l'oxygène. »* Mais cela reste une hypothèse. Pour la valider, il faudrait mesurer directement le courant circulant dans les « câbles » bactériens. Mais l'opération est particulièrement délicate. *« Pour l'instant,* regrette Nils Risgaard-Petersen, *nous n'avons pas réussi à pénétrer la membrane isolante avec des électrodes sans détruire les rainures. »* À défaut, l'équipe cherche donc aussi à identifier les molécules transporteuses d'électrons que ces bactéries doivent forcément produire. ■

Anne Debroise

[1] C. Pfeffer *et al.*, *Nature*, 491, 218, 2012.

ÉCOLOGIE *Un partenariat insolite entre coraux et poissons*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Mehdi Adjeroud est chercheur en écologie corallienne au centre IRD de Nouméa, en Nouvelle-Calédonie.

Des biologistes américains ont récemment découvert un partenariat original entre un poisson corallien et le corail qui l'héberge. De quoi s'agit-il ?

M.A. En milieu corallien, algues et coraux sont en compétition pour coloniser l'espace. Dans la lutte qui l'oppose à l'algue toxique *Chlorodesmis fastigiata*, le corail crème *Acropora nasuta* bénéficie d'un allié de taille : le gobie *Gobiodon histrio*. Dans les îles Fidji, ce petit poisson, qui vit à l'abri du corail, vient en effet brouter l'algue lorsque celle-ci se fait trop envahissante. Jusqu'à maintenant, on ne savait pas comment ce partenariat se mettait en place. Danielle Dixson et Mark Hay, de l'institut de technologie de Géorgie à Atlanta, aux États-Unis, viennent de le découvrir : les gobies sont attirés par une substance chimique que le corail produit lorsqu'il est agressé par l'algue [1].

Comment l'ont-ils prouvé ?

M.A. Sur le terrain, ils ont prélevé des échantillons d'eau à trois endroits différents. D'une part, à proximité d'algues isolées. D'autre part, au niveau de la zone de contact entre l'algue et le corail, d'abord en présence de l'algue, puis 20 minutes après avoir ôté cette dernière. Ils ont ensuite versé ces échantillons à proximité des gobies. Et ils ont constaté qu'après quelques minutes les poissons se dirigeaient vers l'endroit où les deux derniers types d'échantillons avaient été déposés. Cela montre bien qu'une substance chimique – qu'ils n'ont pas encore identifiée – sert de messager.

D'autres espèces de poissons fréquentent ce corail. Peuvent-elles aussi arrêter la progression de l'algue ?

M.A. Deux espèces de poissons demoiselles et une autre variété de gobie qui trouvent refuge dans le corail crème ont été testées. Les demoiselles désertent le corail envahi. Le gobie, lui, le débarrasse de l'algue, sans toutefois manger cette dernière.

Connaît-on d'autres partenariats de ce type en milieu marin ?

M.A. Pas vraiment. À l'image des gobies, certains crabes récifaux protègent leurs coraux-hôtes en repoussant les attaques mortelles des étoiles de mer *Acanthaster*. Cependant, on ignore si ce partenariat repose sur une communication chimique. À ce jour, la relation entre le corail et son gobie protecteur est unique en milieu marin. Mais elle rappelle une symbiose terrestre : celle qui unit l'acacia et les fourmis. Celles-ci reçoivent nourriture et abri grâce à la plante, et en contrepartie, attaquent les insectes venant se repaître du feuillage. C'est cette symbiose qui a incité les biologistes d'Atlanta à rechercher un phénomène analogue entre les coraux et les gobies. ■ **Propos recueillis par Caroline Depecker**

[1] D. L. Dixon *et al.*, *Science*, 338, 804, 2012.

© ROYAL TYRRELL MUSEUM OF PALAEONTOLOGY

Archéologie

En bref

RÉGIME D'AUSTRALOPITHÈQUES

L'alimentation de la seule espèce d'australopithèque qui n'a pas vécu en Afrique du Sud ou de l'Est, mais au Tchad, il y a 3,5 millions d'années, comprenait sans doute des herbes tropicales et des tubercules. C'est la conclusion d'une équipe internationale qui a analysé le carbone contenu dans ses dents. Comme un hominidé plus ancien, daté de 4,4 millions d'années, semble s'être, lui, surtout nourri des fruits et feuilles des arbres, l'équipe se demande s'il n'y a pas eu une mutation dans l'alimentation des hominidés entre ces deux dates. Mais d'autres chercheurs estiment que l'australopithèque tchadien était obligé de se nourrir ainsi, car c'était la seule alimentation suffisamment abondante dans son environnement pour couvrir ses besoins alimentaires.

J. Lee-Thorp *et al.*, *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1204209109, 2012.

ÉQUIPEMENT MINIER

Une roue romaine en bois, destinée au drainage d'une mine d'or, a été découverte en Roumanie par des archéologues français et roumains. Les seules installations de ce type connues jusqu'alors étaient brisées, alors que celle-ci est en place, avec une partie de ses godets et de ses canalisations. L'équipe a aussi retrouvé d'autres objets en bois, très bien préservés par les conditions régnant dans la mine : poutres et étais, échelles, torches, arceaux de hottes, brancards…

http://tinyurl.com/Rosiamontana

sur le web

tinyurl.com/rupestre-australien

Le site Google Art Project présente des photos en haute résolution de 70 œuvres d'art rupestre australien.

ÉPIDÉMIE *Le plus ancien virus de*

QUESTIONS À L'EXPERT

© DR

Éric Crubézy est professeur en anthropobiologie à l'université Paul-Sabatier de Toulouse.

Vous venez d'identifier le plus ancien virus de la variole connu à ce jour. De quand date-t-il ?

E.C. Nous l'avons découvert sur le corps d'une jeune femme datée de la fin du XVII[e] ou du début du XVIII[e] siècle que nous avions mise au jour en Iakoutie, dans l'est de la Sibérie, en 2004 [1]. Un cas de variole avait été mis en évidence sur la momie d'un jeune Napolitain du XVI[e] siècle, étudiée dans les années 1980. Mais seuls une détection et un séquençage de l'ADN viral permettent de confirmer une identification. Les plus anciens exemplaires de virus de la variole ne datent que des années 1950. Or, l'apparition de cette maladie doit remonter à plusieurs milliers d'années.

Où avez-vous découvert ce corps ?

E.C. La jeune femme se trouvait dans un grand coffre en bois, enfoui et gelé dans le permafrost. Il contenait plusieurs corps, vraisemblablement de haut statut social et appartenant à une même famille, d'après une analyse génétique. Trois étaient bien conservés, mais le quatrième, la jeune femme, était dans un état de préservation exceptionnel, avec notamment des vêtements et des restes de parties molles du

Les premières lances remontent à quel

PRÉHISTOIRE

Les restes des plus anciennes lances connues ont été découverts en Afrique du Sud. Elles datent d'environ 500 000 ans.

La période où vivait l'ancêtre commun aux Néandertaliens et aux hommes modernes, il y a 700 000 à 300 000 ans, est très mal connue. C'est celle où l'homme utilise le biface et d'autres outils de la même famille, l'adaptant probablement à différentes fonctions, pour couper la viande ou travailler le bois par exemple. Jusqu'à présent, ces populations ne paraissaient pas avoir disposé d'armes de chasse efficaces. Ces dernières semblaient n'arriver qu'avec les Néandertaliens, sous la forme de lances constituées d'un manche et d'une pierre taillée. Mais une équipe internationale vient de montrer, à partir d'une analyse d'un site du nord de l'Afrique du Sud, que les populations qui ont précédé l'homme de Néandertal utilisaient aussi de telles lances, il y a 500 000 ans [1].

Des traces de chocs. Les archéologues ont examiné des pierres taillées qui avaient été découvertes entre 1979 et 1982 dans ce site, appelé Kathu Pan 1. Leur forme, en effet, pouvait évoquer des pointes de lances. Après examen au microscope, l'équipe a identifié un certain nombre de fissures et d'éclats qui ressemblaient à des traces de chocs. Toutefois, le piétinement des animaux sur les sédiments où sont enfouies les pièces peut également produire de telles marques, mais c'est relativement rare. Cela ne peut expliquer qu'une trentaine

© IMAGE COURTESY OF JAYNE WILKINS

Les pierres taillées ci-dessus sont les répliques de celles qui ont été découvertes sur un site africain. Les marques qu'elles contiennent laissent supposer qu'elles étaient utilisées comme lances, il y a 500 000 ans.

la variole

corps. Contrairement aux trois autres que nous avons autopsiés sur le terrain, nous l'avons mise de côté pour l'étudier en détail plus tard en laboratoire. Bien nous en a pris, car cela nous a permis de récupérer un peu de ses poumons, tissus fragiles qui se conservent rarement.

Comment avez-vous été mis sur la piste de la variole ?

E.C. Les poumons contenaient du sang, nous suggérant que la jeune femme avait succombé à une infection. Comme nous n'avons retrouvé ni virus de la grippe ni d'autres virus, restait un candidat, la variole. Mais en raison de la dangerosité de cette infection, pour laquelle il n'existe aucun traitement, et de l'arrêt de la vaccination systématique, seuls quelques organismes dans le monde sont autorisés à la manipuler. Nous avons donc noué une collaboration avec l'unité Émergence et coévolution virale de Marseille. Grâce à cela, nous avons pu identifier le virus de la variole dans nos échantillons. Il nous a fallu toutefois démontrer que l'ADN du virus était fragmenté en de trop petits morceaux pour être actif. Nous n'avons étudié que certains fragments, séparément les uns des autres. Une fois ces précautions prises, nous avons pu séquencer les gènes responsables de la virulence.

Que nous apprend cette découverte ?

E.C. D'abord, c'est un premier pas pour retracer l'évolution du virus au cours de l'histoire. Comparées aux séquences génétiques récentes du virus de la variole, celles que nous avons obtenues présentent un certain nombre de différences. Il y a donc eu modification du virus, voire apparition de plusieurs souches. Ensuite, par leur préservation, les tombes gelées de Iakoutie représentent une opportunité unique d'étudier l'impact d'épidémies massives. L'arrivée des Russes dans ces régions reculées aux XVII[e] et XVIII[e] siècles a provoqué une vague d'infections particulièrement meurtrières. Nous cherchons à savoir quel rôle exact a joué la variole dans ces épidémies, aux côtés d'autres infections comme la coqueluche, que nous avions identifiée récemment dans une autre tombe iakoute de la même époque. ■ **Propos recueillis par Nicolas Constans**

[1] P. Biagini *et al.*, *NEJM*, 367, 2057, 2012.

que 500 000 ans

de pièces sur les un peu plus de deux cents étudiées présentent ces marques.

En outre, les chocs reçus par les pièces étaient plus souvent situés près de leur pointe. C'est exactement ce qui se passerait si les hommes s'en étaient servis comme lances. Enfin, la base où devrait se placer le manche éventuel était retouchée, dans 13 % des cas. *« Quand une pierre taillée et un manche s'ajustent mal, il est plus facile de retoucher la base de la pierre que de retailler le bois »*, explique Vincent Mourre, de l'Inrap.

Pour confirmer leur hypothèse, les archéologues ont fabriqué des pierres taillées identiques et les ont emmanchées sur des tiges en bois pour former des lances. Puis ils les ont projetées sur des carcasses de *springboks* (antilope d'Afrique), à l'aide d'une d'arbalète reproduisant le lancer par un homme. Ils les ont ensuite examinées. Après plusieurs essais, certaines présentaient des traces de chocs. La localisation et les caractéristiques de ces traces étaient similaires à celles des pierres taillées du site. Conclusion : il est tout à fait plausible que les pierres taillées de Kathu Pan 1 soient des restes de sagaies, lancées par les hommes lors de la chasse, même si d'autres utilisations sont possibles.

« C'est une étude solide, sérieusement argumentée et documentée », estime Jacques Pélegrin, du CNRS. Certains préhistoriens restent néanmoins prudents sur la datation des pierres taillées. *« J'attends que cette découverte soit confirmée par d'autres dans des sites aussi anciens »*, indique Francesco d'Errico, du CNRS. D'autres études récentes, notamment en Afrique du Sud et au Kenya, suggèrent en tout cas que cette période était plus riche en innovations techniques que ne le pensaient les préhistoriens. ■ **N.C.**

[1] J. Wilkins *et al.*, *Science*, 338, 942, 2012.

© THE NATIONAL MUSEUM OF DENMARK

zoom Suaire à l'ortie

Ce fragment de textile datant de la fin de l'âge du bronze, vers 800 av. J.-C., est tissé avec un textile jusqu'ici inédit pour des époques aussi anciennes : des fibres d'ortie. Une équipe internationale vient d'en identifier certains éléments caractéristiques. Le tissu entourait des restes humains incinérés et placés dans une urne. Bien que découverte au Danemark, le style de cette dernière et des analyses chimiques sur l'ortie indiquent que l'ensemble était vraisemblablement importé d'Autriche. À l'époque, les populations d'Europe centrale cultivaient des plantes plus usuelles dans la confection de tissus, comme le lin. L'utilisation de l'ortie suggère que les tisserands de l'âge du bronze n'hésitaient pas à recourir à des plantes sauvages pour obtenir des variétés particulières de textile.

C. Bergfjord *et al.*, *Sci. Rep.*, doi:10.1038/srep00664, 2012.

En bref

EXTENSION DE LA MALADIE DE PARKINSON

La maladie de Parkinson se propagerait dans le cerveau *via* une protéine anormale. Des biologistes américains ont constaté que, chez une personne malade, les neurones produisant de la dopamine contiennent des fragments d'une forme pathologique d'une protéine nommée alpha-syn. Ils ont injecté chez des souris une version synthétique de cette protéine anormale dans une zone riche en neurones à dopamine : des agrégats anormaux de protéines s'y sont formés, entraînant leur mort, caractéristique de la maladie. Ils ont aussi détecté ces agrégats dans des neurones proches du lieu d'injection, signe que le processus de dégénérescence se transmet de cellule à cellule.

K. C. Luk *et al.*, *Science*, *338*, 949, 2012.

ANESTHÉSIE ET SOMMEIL

L'anesthésie générale, dont les mécanismes restent en partie méconnus, activerait des réseaux neuronaux liés au sommeil. Pour le montrer, des chercheurs américains ont implanté des électrodes chez des souris, au niveau d'une structure cérébrale profonde, l'hypothalamus. Puis ils leur ont administré un anesthésique, l'isoflurane. Résultat : une fois les souris inconscientes, le nombre de neurones actifs a augmenté dans une zone de l'hypothalamus impliquée dans le déclenchement du sommeil. De plus, des souris chez qui cette zone avait été supprimée ont été résistantes à l'anesthésie.

J. T. Moore *et al.*, *Curr. Biol.*, *21*, 9833, 2012.

sur le web

http://psychcentral.com

Ce site d'informations générales sur la santé mentale propose des blogs d'universitaires thématiques (en anglais).

Un atlas inédit de la matière

Ces images colorisées de fibres nerveuses, obtenues par IRM de diffusion, illustrent la façon dont les régions du cerveau sont connectées. La cartographie d'un cerveau humain est restituée dans un atlas de la connectivité. © D. DUCLAP, S. CHANTOT, J. BERTRAND, G. KUSTAVAN, O. LE BIHAN, F. MANGIN, P. POUPON

NEUROSCIENCES

Des neuroscientifiques ont réalisé la carte la plus précise de la matière blanche cérébrale. Sa prouesse ? Localiser les fibres nerveuses à l'échelle microscopique et macroscopique, à partir de cerveaux vivants.

Pour réfléchir, agir ou percevoir, nous avons besoin de « matière grise », le corps des neurones. Mais pas uniquement. Près de la moitié de notre cerveau est composée de ce qu'on appelle la matière blanche, formée par les prolongements des neurones ou axones. Ces fibres nerveuses assurent les connexions cérébrales et permettent la transmission des informations entre les différentes régions du cerveau. Longtemps négligée pour des raisons techniques, la matière blanche est aujourd'hui au cœur de plusieurs grands projets d'imagerie qui cherchent à établir un plan de la connectivité cérébrale. Pour la première fois, un projet européen et israélien baptisé « Connect » vient d'établir un atlas de la connectivité des fibres nerveuses non seulement au niveau macroscopique, comme l'ont déjà fait d'autres équipes, mais aussi au niveau microscopique, et ce à partir de sujets vivants [1].

Comment les neuroscientifiques ont-ils procédé ? Jusqu'à récemment, un tel atlas ne pouvait être réalisé qu'à partir de coupes de cerveaux provenant d'un petit nombre de personnes ayant donné leur corps à la science. En effet, les techniques d'imagerie cérébrale ne permettaient pas d'analyser la structure des fibres nerveuses à l'échelle cellulaire sur l'ensemble du cerveau. Mais les atlas établis à partir de coupes anatomiques ne sont pas complètement fiables : le cerveau subit des altérations lors de son prélèvement, de sa fixation dans le formol ou de sa coupe.

Cerveau de sujet vivant. Pour contourner ce problème, les équipes du projet Connect ont eu l'idée de construire un nouvel atlas à partir des cerveaux de sujets vivants. Pour cela, elles ont utilisé une technique d'imagerie récente et très précise, l'IRM de diffusion. Celle-ci est déjà employée par d'autres équipes dans le monde pour modéliser les fibres nerveuses à l'échelle macroscopique. L'IRM de diffusion mesure la propagation de l'eau dans un tissu : en suivant le parcours des molécules d'eau dans la matière blanche, on peut modéliser la position et l'orientation des fibres nerveuses.

Les neuroscientifiques du projet Connect ont affiné cette technique en inventant de nouveaux algorithmes qui permettent cette fois de modéliser les paramètres microscopiques de la matière blanche. Comme le déplacement des molécules d'eau est contraint par la structure cellulaire des fibres nerveuses, l'IRM de diffusion permet de déduire certaines caractéristiques de ces prolongements de neurones à l'échelle microscopique, tels le diamètre ou la densité.

Plus de 100 volontaires âgés de 25 à 35 ans ont été examinés avec cette technique. Pour chacun d'eux, les neuroscientifiques ont analysé chaque millimètre carré de tissu cérébral. Puis ils en ont extrait

blanche

les caractères communs afin d'établir la cartographie d'un cerveau standard.

« Par son ampleur et ses perspectives, ce type de projet est similaire au séquençage du génome humain, estime Arnaud Cachia, de l'université Paris-Descartes. *Grâce à cet atlas, on pourra étudier la trace laissée par l'exécution d'une tâche cognitive ou son apprentissage sur la microstructure de la matière blanche. Il permettra aussi d'étudier les altérations microscopiques et macroscopiques de la connectivité cérébrale dans des maladies psychiatriques ou neurologiques, et ainsi d'identifier des marqueurs de vulnérabilité et d'évaluer l'efficacité des traitements ».* ■ **Jacques Abadie**

[1] http://www.brain-connect.eu

zoom Le cacatoès bien outillé

Ce cacatoès de Buffin, prénommé Figaro, se sert d'un bout de bois pour rapprocher la noix de cajou qui se trouve de l'autre côté de la grille. C'est la première fois que l'on observe un tel comportement chez un cacatoès : contrairement à d'autres oiseaux, comme le corbeau de Nouvelle-Calédonie, qui fabriquent des tiges et des crochets pour attraper des larves d'insectes, le cacatoès n'est pas connu pour utiliser des outils à l'état sauvage. Figaro, lui, a inventé spontanément son outil en découpant avec son bec une bordure de l'enclos où il est élevé, près de Vienne, en Autriche. Il l'a même retaillé pour obtenir la longueur voulue. La fabrication d'outils pourrait donc émerger chez des espèces qui ne possèdent pas naturellement cette compétence.

A. M. I. Auersperg *et al.*, *Curr. Biol.*, *21*, R903, 2012.

© ALICE AUERSPERG/DPT OF COGNITIVE BIOLOGY/UNIV. OF VIENNA

Un mal nécessaire ?

en vente actuellement en kiosque

En bref

LES ALLEMANDES PLUS ACTIVES QUE LES FRANÇAISES ?

Le taux d'emploi féminin en 2010 chez les 15-64 ans a atteint 66 % en Allemagne, contre 60 % en France, selon les données d'Eurostat, la direction chargée des statistiques pour la Commission européenne. Toutefois, ces chiffres voilent une réalité plus complexe. En fait, ce décalage entre taux allemand et taux français est dû au recours plus important au travail à temps partiel en Allemagne (45 %) qu'en France (30 %). En termes de taux d'emploi en équivalent temps plein, la France dépasse l'Allemagne. Les Françaises ne sont donc pas moins actives que les Allemandes : elles sont moins nombreuses à travailler et s'arrêtent de travailler plus jeune, mais leurs journées de travail sont plus longues, et elles continuent plus souvent de travailler quand elles ont des enfants.

http://bit.ly/Ws5Gnx

sur le web

http://unfpa.org/ageingreport

Le Fonds des Nations unies pour la population présente son rapport 2012 consacré au vieillissement de la population mondiale.

La tristesse rend l'individu moins prudent

NEUROÉCONOMIE

Après le dégoût et le regret, une étude suggère pour la première fois que le sentiment de tristesse provoque des comportements irrationnels quand vient le temps des choix financiers.

« *Sadder but wiser.* » Cette expression du philosophe britannique Samuel Taylor Coleridge traduit l'idée que la tristesse rend les gens plus prudents et les protège des mauvais choix. L'équipe de Jennifer Lerner, du laboratoire des sciences de la décision à l'université de Harvard, a repris cette expression et a démontré son invalidité en matière de choix économique [1].

Les chercheurs ont pour cela évalué l'effet de la tristesse sur le « facteur de dévaluation temporelle » qui, en économie expérimentale, traduit dans quelle mesure le temps peut modifier la perception de la valeur d'une récompense. « *Par exemple, si l'on propose à quelqu'un de récupérer 100 euros tout de suite contre 120 euros dans 3 mois, il préférera recevoir une récompense immédiatement plutôt qu'attendre* », illustre Thomas Boraud, directeur de recherche en neurosciences au CNRS. Mais à mesure que l'écart se creuse entre ces deux sommes d'argent, arrive un seuil où la valeur de la récompense tardive devient plus intéressante qu'un bénéfice immédiat. L'étude de Jennifer Lerner montre que la tristesse augmente ce seuil : les sujets tristes sont moins sensibles aux récompenses tardives, il faut donc leur en promettre plus pour les intéresser.

Trois films. Avant d'en tirer ces conclusions, l'équipe de l'université de Harvard a mené trois expériences sur 200 volontaires chaque fois. Séparés en trois groupes, ils ont visionné trois vidéos différentes : un film triste, un autre inspirant le dégoût – pour vérifier si un sentiment négatif autre que la tristesse pouvait avoir un même effet sur la prise de décision – et un film au contenu neutre, pour le groupe témoin. Les volontaires remplissaient ensuite des formulaires pour évaluer leur état émotionnel, puis choisir entre une récompense financière immédiate ou une autre plus tardive, mais plus importante.

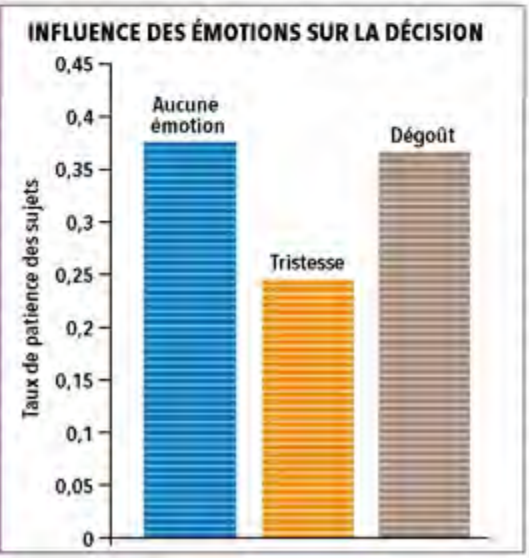
Chacune des trois expériences arrive à la même conclusion tout en apportant de nouvelles informations. La première expérience révèle qu'en moyenne les sujets tristes préfèrent empocher 37 dollars immédiatement plutôt qu'attendre 3 mois pour gagner 85 dollars. Ceux du groupe « neutres » ou « dégoûtés », au contraire, n'acceptent une somme immédiatement qu'à partir de 56 dollars.

La seconde expérience détermine la raison qui pousse l'individu à réagir. « *Il semblerait que les gens envisagent d'abord la solution à court terme avant de considérer, dans un deuxième temps seulement, celle à long terme. Si bien que le degré de priorité suit cet ordre, et la première solution leur apparaît comme la meilleure* », explique Thomas Boraud. La troisième expérience montre que, pour des choix impliquant des récompenses à long terme (2 à 4 semaines) et à très long terme (4 à 6 semaines), la tristesse n'est plus déterminante.

Les gens tristes développent donc davantage de comportements irrationnels en matière de choix économique. De là à tirer des leçons politiques et sociales à cette étude, rien n'est moins évident. « *Il faut rester prudent quand on extrapole à la vie réelle une étude menée dans un laboratoire où les paramètres sont contrôlés,* estime Thomas Boraud. *Toutefois, ce genre d'étude est intéressant car il renforce nos connaissances sur l'interaction entre les émotions et l'irrationalité des prises de décisions.* » ■ **Gautier Cariou**

[1] J. S. Lerner *et al.*, *Psychological Science*, doi : 10.1177/0956797612450302, 2012.

INFLUENCE DES ÉMOTIONS SUR LA DÉCISION



Comparés aux individus ressentant du dégoût ou qui n'éprouvent aucun sentiment, les sujets éprouvant de la tristesse se montrent moins patients : ils préfèrent recevoir tout de suite une somme d'argent plutôt que d'attendre pour en recevoir une plus importante.

© SOURCE PSYCHOLOGICAL SCIENCE

3 CD INDISPENSABLES !

VOTRE MAGAZINE + 3 CD

- **Le Trouvère par Karajan**
- **Les Diapason d'or du mois**

EN VENTE ACTUELLEMENT

En bref

EMBRYONS À TROIS PARENTS

Certaines maladies graves sont dues à la déficience des mitochondries, organites qui produisent l'énergie des cellules et sont transmises par la mère, *via* ses ovules. D'où l'idée de remplacer les mitochondries déficientes par des saines dans les ovules destinés à être fécondés. Afin de tester cette idée, une équipe américaine a isolé le noyau d'ovules humains. Puis elle a transféré ces noyaux dans les ovules d'autres femmes, pourvus de leurs mitochondries mais privés de noyaux. Fécondés *in vitro*, les embryons dotés de trois parents étaient viables. Leur développement n'a pas été poursuivi.

M. Tachibana et al., Nature, doi 10.1038/nature11647, 2012.

SIGNES PRÉCOCES D'ALZHEIMER

La maladie d'Alzheimer se déclencherait au moins vingt ans avant l'apparition des premiers symptômes. C'est ce que révèle une étude américaine sur 44 personnes de 18 à 26 ans, dont 20 portaient une mutation provoquant à coup sûr l'apparition de la maladie vers 50 ans. Ces 20 personnes montraient déjà des concentrations plus élevées de peptide bêta-amyloïde (molécule qui s'accumule dans le cerveau des malades) et une suractivité cérébrale de deux régions impliquées dans la mémoire.

E.M. Reiman et al., The Lancet Neurology, 11, 1048, 2012.

sur le web

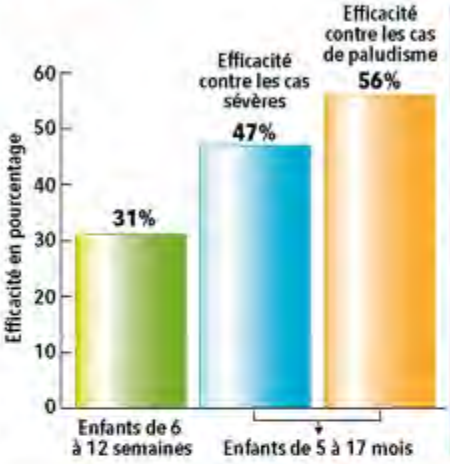
www.grippenet.fr

Lancé par le réseau Sentinelles et l'Institut de veille sanitaire, ce système de surveillance de la grippe entame sa deuxième saison. Le concept : collecter des informations sur l'évolution de la grippe auprès des internautes.

Sérieux revers pour le vaccin antipaludique

MALADIE PARASITAIRE

Testé sur plus de 6 000 nourrissons, le plus avancé des candidats vaccins contre le paludisme, le RTS,S, n'a réduit que d'un tiers les cas de paludisme.



Le vaccin RTS,S, testé sur 6 537 nourrissons de 6 à 12 semaines, cible stratégique d'un futur vaccin, n'a été efficace que pour 31 % d'entre eux (en vert). Les résultats sur 6 000 enfants de 5 à 17 mois étaient plus prometteurs, avec une efficacité comprise entre 47 % et 56 %. ■ SOURCE NEJM

Après des centaines de millions de dollars investis par le laboratoire GSK et la Fondation Bill & Melinda Gates, le candidat vaccin contre le paludisme, le RTS,S sera-t-il un jour commercialisé ? La question se pose après de nouveaux résultats obtenus dans le cadre d'un essai sur 6 537 nourrissons africains âgés de 6 à 12 semaines, suivis pendant un an. En effet, le RTS,S n'a réduit que d'environ 30 % les épisodes de paludisme [1]. C'est nettement moins que les quelque 50 % obtenus l'an passé dans un essai sur près de 6 000 enfants âgés de 5 à 17 mois.

Or, les bébés de 6 à 12 semaines constituent une cible stratégique. En effet, dans les pays pauvres, tout vaccin antipaludique, lorsqu'il sera conçu, devra être administré en même temps que les autres vaccins pédiatriques, dans des infrastructures dédiées. Autre point noir : *« L'efficacité du RTS,S semble s'estomper au bout de trois à quatre mois »*, indique Pierre Druilhe, ex-directeur du laboratoire de paludo-vaccinologie de l'Institut Pasteur, en charge du développement d'un candidat vaccin concurrent.

Certes, le parasite responsable du paludisme est bien plus complexe à cibler qu'un virus. Raison pour laquelle il n'existe encore aucun vaccin antiparasitaire à l'heure actuelle. En outre, un vaccin antipaludique serait de toute façon utilisé en complément d'autres méthodes de protection. Parmi elles : les lits dotés de moustiquaires imprégnées d'insecticide. Dans cet essai, c'était le cas pour 86 % des nourrissons. *« Dans ce contexte, ce n'est donc pas si mal d'avoir obtenu une efficacité supplémentaire d'environ 30 % »*, tempère Éric Mouzin, épidémiologiste au partenariat « Faire reculer le paludisme », à Genève.

Espoirs déçus. Mais de l'avis de Bill Gates dans un communiqué, cette efficacité d'environ 30 % est *« plus faible que ce que nous espérions »* ; et à mots couverts, certains experts n'hésitent pas à parler du *« début de la fin »*, pour le RTS,S.

Car selon les projections de l'Organisation mondiale de la santé, pour obtenir un rapport coût-efficacité suffisant, un vaccin antipaludique devrait atteindre une efficacité de 50 % minimum, avec un effet protecteur durant plus d'un an. Les vaccins classiques ont d'ailleurs une efficacité supérieure à 80 %. *« D'après les résultats de ce nouvel essai, le RTS,S ne semble pas près de devenir un vaccin de routine pour les nourrissons »*, estime ainsi Odile Puijalon, spécialiste du paludisme à l'Institut Pasteur. *« Dans des zones où le parasite est très présent, cette efficacité de 30 % pourrait quand même avoir un impact positif »*, estime pour sa part Éric Mouzin. Mais seuls les résultats définitifs permettront de trancher.

C'est pourquoi l'évaluation à grande échelle du RTS,S se poursuivra jusqu'en 2014, date à laquelle seront publiés l'ensemble des résultats avec un suivi de 30 mois. On découvrira également si l'efficacité du vaccin est améliorée par une dose « booster », censée stimuler le système immunitaire, et administrée 18 mois après la troisième dose du protocole de base. ■ **Jean-Philippe Braly**

[1] *The RTS,S Clinical Trials Partnership, NEJM*, doi : 10.1056/NEJMoa1208394, 2012.

MÉDICAMENT *Première thérapie génique autorisée en Europe*

QUESTIONS À L'EXPERT

© PASCAL ANDRIEUX

Pascale Benlian est spécialiste de la déficience en lipoprotéine lipase, à l'Institut européen de génomique du diabète, à Lille.

Pour la première fois, l'Europe autorise une thérapie génique. Contre quelle maladie permet-elle de lutter ? [1]

P.B. Contre une maladie génétique incurable, la déficience en lipoprotéine lipase, qui touche une à deux personnes sur un million. Elle se traduit par une inflammation du pancréas extrêmement douloureuse et parfois mortelle. Les malades présentent des mutations sur le gène codant l'enzyme lipoprotéine lipase (LPL), ce qui la rend très peu active, voire inactive. Or, elle est indispensable pour décomposer de grosses lipoprotéines, les chylomicrons, qui véhiculent certaines graisses alimentaires dans le sang. Ces chylomicrons s'accumulent, obstruent les petits vaisseaux sanguins du pancréas, provoquant cette inflammation.

Quel est le principe de ce traitement ?

P.B. Comme toute thérapie génique, celui-ci, nommé Glybera, consiste à injecter dans les muscles des cuisses des patients des virus rendus inoffensifs. Ces derniers véhiculent la copie fonctionnelle du gène humain de la LPL et la déposent dans le noyau des cellules musculaires, sans les intégrer au génome. Les cellules sont alors censées produire la LPL fonctionnelle, qui passe ensuite dans le sang. Les virus sont administrés au cours d'une opération chirurgicale, *via* une cinquantaine d'injections dans les muscles des cuisses. Ce type de muscles constitue en effet l'un des principaux sites de synthèse de la LPL chez le sujet sain.

À quel point cette thérapie est-elle efficace ?

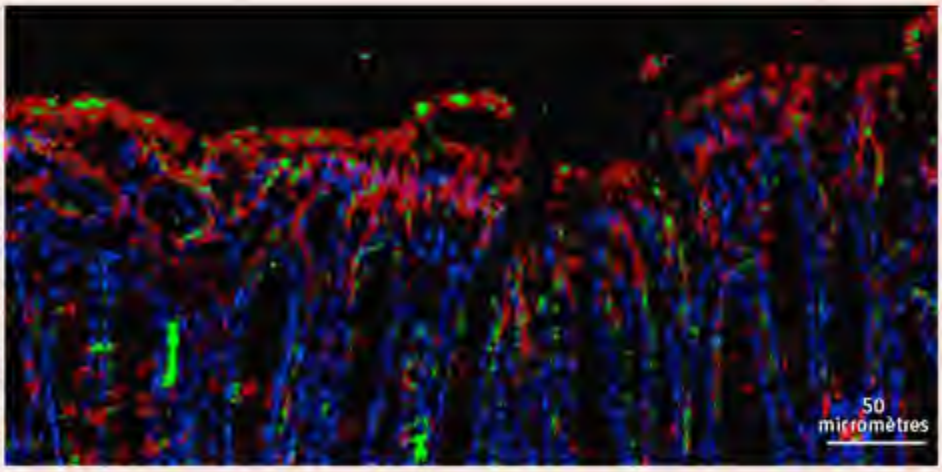
P.B. Elle a été testée sur 27 malades : la plupart d'entre eux l'ont bien tolérée. Sur six mois de suivi, la LPL saine est bien présente dans les cellules musculaires. Et sur un an de suivi, on note une diminution du nombre de chylomicrons au profit de lipoprotéines plus petites. Le taux de chylomicrons reste toutefois très élevé, suggérant que seule une très faible quantité de LPL atteint la circulation sanguine. D'ailleurs, la LPL saine restait indétectable dans le sang des malades. Enfin, sur 12 patients suivis pendant trois ans, la survenue et la sévérité des crises inflammatoires ont diminué, mais n'ont pas complètement disparu [2]. Ces résultats mitigés sont peut-être dus à une trop faible efficacité de la stratégie choisie : injections locales, vecteur viral utilisé... Et sont à mettre en regard du coût important de ce traitement.

Combien coûtera-t-il ?

P.B. Son prix est annoncé à 1,25 million d'euros par patient. D'un point de vue purement médical, ce prix est discutable. En effet, le Glybera semble plus une béquille qu'un médicament susceptible de guérir les malades pour toujours. Le laboratoire uniQure justifie ce montant par l'importance des investissements engagés qui ne pourront être rentabilisés que sur une centaine de malades. Après de premiers avis négatifs, les autorités européennes n'ont finalement autorisé le Glybera que pour les patients adultes aux inflammations aiguës et récurrentes du pancréas, malgré un régime appauvri en graisses ; en outre, les malades présentant certaines mutations sont exclus. ■ **Propos recueillis par J.-P.B.**

[1] http://tinyurl.com/cy7htet

[2] D. Gaudet *et al.*, *Curr Opin Lipidol*, 23, 310, 2012.



© J.-P. MOTTA, C. DERAISON, N. VERGNOLLE, INSERM

zoom

Bactéries anti-inflammatoires

Le côlon de cette souris, dont on voit les cellules de surface en rouge, est l'objet d'inflammations chroniques. Chez l'homme, ce problème est lié à une difficulté à synthétiser une protéine, l'élafine. Pour venir à bout de cette maladie, une équipe franco-canadienne a doté des bactéries du gène humain de l'élafine. Avalées par l'animal, les bactéries se sont retrouvées dans son côlon et ont fabriqué la précieuse protéine (en vert). Mises en contact avec des cellules intestinales humaines, ces bactéries modifiées ont eu un effet protecteur similaire. Une piste à creuser pour traiter les patients atteints de maladies inflammatoires chroniques de l'intestin. *J.-P. Motta et al., Sc Transl. Med., 4, 158ra, 144, 2012.*

En bref

BATTERIES HUMAINES

Les implants médicaux, comme les puces électroniques ou les pacemakers, ont besoin d'une batterie pour fonctionner. Cela limite les sites d'implantation et demande plusieurs opérations pour changer la batterie. Une équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT), aux États-Unis, a découvert qu'une différence de potentiel électrique entre deux parties de la cochlée pouvait être utilisée comme source d'énergie. Une puce implantée dans l'oreille interne d'un cochon de Guinée a ainsi transmis des données pendant 5 heures en utilisant les 1,12 nanowatt du potentiel endocochléaire. C'est l'une des rares batteries biologiques potentielles identifiées au niveau de la tête.

P. Mercier *et al.*, *Nature biotechnology*, doi:10.1038/nbt.2394, 2012.

SPARADRAP MOINS DOULOUREUX

C'est le dilemme : soit les sparadraps ne collent pas, soit ils collent trop et deviennent sources de douleur lors du retrait. Ou à cela ne tienne, des chercheurs du MIT et de l'école de médecine de Harvard ont mis au point un film adhésif innovant. Leur idée ? Ajouter entre la partie collante et la partie plastique une fine couche de silicone. Cette dernière est découpée par un laser selon un quadrillage précis, de façon à ce que l'adhésif et le plastique soient régulièrement mis en contact. Cela a permis de concevoir un sparadrap plus tendre avec la peau.

B. Laulicht *et al.*, PNAS, doi:10.1073/pnas.1216071109, 2012.

sur le web

http://codebarre.tv/fr/#/fr

Ce webdocumentaire réunit 100 courts-métrages consacrés aux objets qui nous entourent.

TRAVAUX PUBLICS *Des déblais de chantier pour la construction ?*

QUESTIONS À L'EXPERT

© IFSTTAR

Thierry Dubreucq est ingénieur dans le département géotechnique, eaux, risques, de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.

Vous commencez à trouver des moyens pour rendre utilisables des terres jusque-là considérées comme impropres à la construction. Sur quel chantier en particulier ?

T.D. C'est sur le projet de ligne à grande vitesse Bretagne-Pays de la Loire entre Le Mans et Rennes que nous travaillons depuis deux ans avec Réseau ferré de France. Sur le tracé envisagé, les études géotechniques ont montré la présence d'une quantité importante d'altérites de micaschistes, formation géologique issue de l'altération des sols, très fréquente en Bretagne. Or celle-ci ne peut être utilisée pour construire des plates-formes ferroviaires. Pour tenter de changer cela, en laboratoire, nous avons mélangé ces altérites à diverses concentrations de ciment et de chaux industriels. Après compactage, nous avons testé les échantillons afin d'évaluer notamment leur résistance mécanique ou leur perméabilité. Grâce à cette approche empirique, nous avons montré que certains traitements amélioraient les propriétés générales du matériau. Nous tentons maintenant d'en comprendre les causes à l'échelle microscopique et atomique.

Quel est l'intérêt de rendre ces matériaux utilisables pour les travaux publics ?

T.D. Sous les voies ferrées ou les routes, on trouve des structures en terre dont le rôle est de supporter les rails, le bitume, ou d'aplanir le relief. Dans l'idéal, on devrait construire ces routes en utilisant les terres ôtées ailleurs sur le chantier, les déblais. Mais c'est impossible car bon nombre de terres, comme les argiles gonflantes ou les sols tourbeux, sont impropres à la construction. Ils sont mis en dépôt et remplacés par des granulats issus de carrières. Cela entraîne des nuisances environnementales dues au transport, ainsi qu'un épuisement progressif des ressources. En région parisienne et en Aquitaine, on importe déjà des granulats de l'étranger. Notre objectif est donc de rendre utilisables 100 % des déblais d'ici 2020. Mais la tâche est énorme car les techniques de construction n'ont guère évolué depuis les années 1990.

Pensez-vous qu'un jour on pourra utiliser tous les déblais ?

T.D. Probablement pas, mais on peut y tendre. Outre les déblais, les ouvrages en terre intègrent souvent des restes de bâtiments démolis ou des résidus d'usine. Et le résultat n'est pas toujours à la hauteur des attentes. L'intégration de sous-produits sidérurgiques sous certaines routes a déjà causé des gonflements de la chaussée, ce qui a nécessité des réparations. Pourtant, beaucoup de matériaux pourraient être recyclés dans le réseau routier. Reste à trouver les procédures permettant la bonne intégration de ces produits. ■ **Propos recueillis par Viviane Thivent**

zoom Le plus grand parc houlomoteur du monde

Cette vue d'artiste donne un aperçu du parc houlomoteur qui sera construit entre 2013 et 2015 en Suède, au large de la ville de Lysekil. On y voit un alignement de générateurs posés au fond de la mer. Ils pèsent 2 tonnes chacun et renferment des pistons reliés en surface à d'imposants flotteurs. Ceux-ci montent et descendent en suivant la houle, ce qui actionne le piston. Infrastructure unique au monde dont la technologie a été imaginée par des chercheurs de l'université suédoise d'Uppsala, cette centrale couvrirait une surface 500 mètres carrés pour 462 générateurs. À terme, elle fournirait 0,75 térawattheure par an.

© SWEDISH CENTRE FOR RENEWABLE ELECTRIC ENERGY CONVERSION, UPPSALA UNIVERSITY

Vers une peau de robot sensible au toucher

MATÉRIAUX

En améliorant un composé créé en 2008 par une équipe française, des Américains ont mis au point un matériau pouvant être utilisé comme une peau pour des robots.

La peau humaine différencie une claque d'une caresse. Elle se déforme à loisir et cicatrise lorsqu'elle est abîmée. Dans les fantasmes des roboticiens, la peau d'un robot devrait donc pouvoir faire de même. *« C'est ardu,* note Daniel Sidobre, spécialiste de l'interaction homme-robot au laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS) de Toulouse. *La peau est constituée de cellules qui se renouvellent en permanence et qui forment une myriade de petits capteurs. Pas facile à imiter. »* Mais peut-être pas impossible. Benjamin Tee et ses collaborateurs de l'université Stanford viennent en effet de présenter un matériau flexible capable de différencier les fortes pressions des légères, et de restaurer seul sa structure et sa conductivité [1].

Imaginée dans les années 1980 par une équipe du LAAS, la première « peau artificielle » est une structure alvéolée de caoutchouc chargé de carbone. *« Cette peau recouvrait une main robotisée,* se souvient Daniel Estève, du LAAS. *Quand on exerçait une pression sur cette surface, on fermait les alvéoles, ce qui augmentait localement la conductivité du matériau. »* Détectées par des capteurs sous-jacents, ces modifications confèrent au robot un sens du toucher rudimentaire.

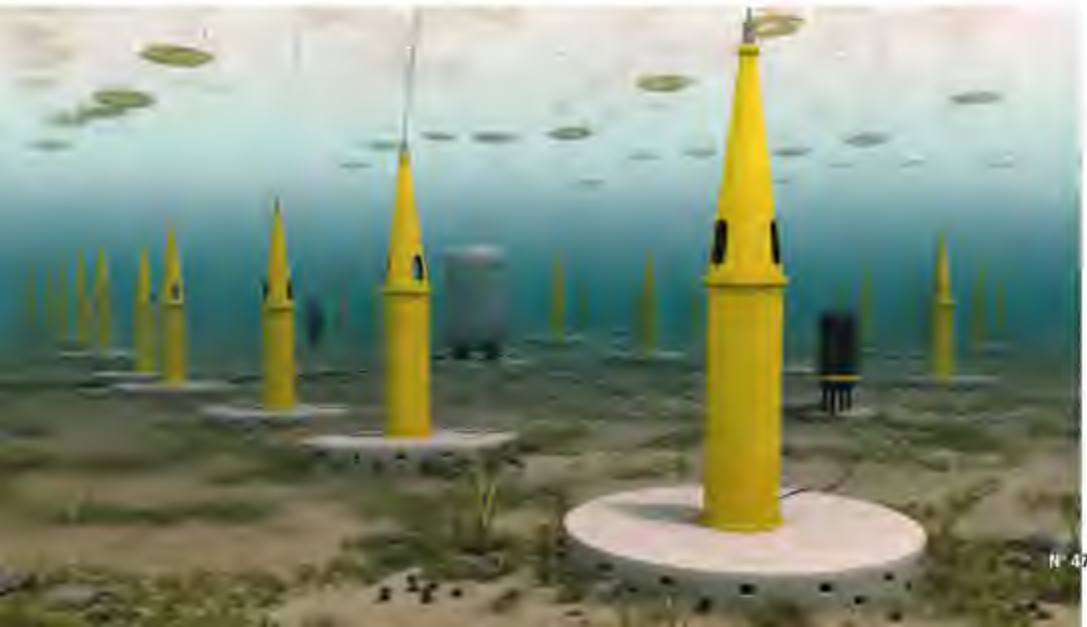
Autoréparation. Dans les années qui suivent, les chercheurs reprennent l'idée en utilisant des polymères chargés en carbone, en nickel, ou encore en cuivre. Il n'y a plus de trous. Lorsque les microparticules s'approchent sous l'effet d'une pression, elles changent la conductivité. *« Ces matériaux réagissent bien aux variations de pression mais ils sont fragiles et résistent mal dans le temps »,* insiste Daniel Sidobre. D'où l'idée des chercheurs de Stanford : choisir une matrice capable de s'autoréparer.

Après avoir testé plusieurs matériaux, ces chimistes se sont intéressés à un composé créé en 2008 par une équipe de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de Paris (ESPCI) [2]. *« Il s'agit d'un polymère supramoléculaire »,* précise François Tournilhac de l'ESPCI et co-inventeur du matériau. Les polymères supramoléculaire sont constitués de petites molécules – dérivées d'acides gras, urée, amines – unies les unes aux autres par des liaisons hydrogène qui peuvent se casser mais aussi se reformer spontanément après rupture, d'où les propriétés d'autorégénération du composé.

En ajoutant 30 % de microparticules de nickel, les chercheurs de Stanford ont rendu le polymère supramoléculaire conducteur d'électricité). Ce dernier est ainsi devenu sensible à la pression sans pour autant perdre sa flexibilité. Plus intéressant encore, en cas de lésion, le matériau restaure sa structure et sa conductivité électrique, le tout à température ambiante et en moins de 15 secondes. Le résultat laisse envisager de nombreuses applications techniques dans le secteur de la robotique ou des prothèses. *« Surtout que notre matériau a été conçu pour être fabriqué à l'échelle industrielle »,* ajoute François Tournilhac.

Preuve de principe, les chercheurs de Stanford ont clos leur étude en intégrant leur peau électronique à un mannequin humanoïde. Ils ont ainsi montré que ce matériau permettait de détecter des changements de position du corps ou encore de différencier les fortes pressions des légères. ■ **V.T.**

En appuyant sur la paume de la main de ce mannequin recouverte de peau artificielle, on rapproche les microbilles de nickel qu'elle contient (en médaillon), ce qui en modifie la conductivité. © BENJAMIN TEE/DPT OF ELECTRICAL ENGINEERING/STANFORD UNIVERSITY



[1] B. Tee *et al.*, *Nature Nanotechnology*, doi: 10.1038/NANO.2012.192, 2012.

[2] P. Cordier *et al.*, *Nature*, 451, 977, 2008..

Acteurs

Nominations du mois

CCNE
JEAN-CLAUDE AMEISEN,

61 ans, va présider le Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé. Professeur d'immunologie à la faculté de médecine Xavier-Bichat, il dirige une équipe de recherche sur les réactions aux greffes, à l'université Paris-Diderot. Depuis 2003, il préside le comité d'éthique pour la recherche médicale de l'Inserm.

Conservatoire de l'espace littoral
ODILE GAUTHIER,

50 ans, a pris la direction générale du Conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres. Ingénieure générale des mines, elle était directrice de l'eau et de la biodiversité à la direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature. Au ministère de l'Écologie et du Développement durable, elle a notamment été adjointe au directeur général de la prévention des risques.

Idex Paris-Saclay
PATRICK LEBŒUF,

52 ans, directeur de recherche spécialiste de la mécanique quantique à l'université Paris-Sud, est nommé directeur délégué à la Recherche de l'initiative d'excellence de Paris-Saclay. Auparavant, il était directeur adjoint scientifique du CNRS à l'institut de physique.

Récompense

Francis Martin

Le biologiste Francis Martin a reçu les lauriers de la recherche agronomique de l'INRA pour ses travaux sur les mécanismes de symbiose entre les arbres et les champignons forestiers.

Directeur de recherche au département écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques de l'INRA, Francis Martin a reçu les lauriers de la recherche agronomique décernés par l'institut. À 58 ans, il compte 200 publications depuis son entrée à l'INRA en 1981. Dès ses premières recherches, il étudie les interactions entre les arbres et les champignons symbiotiques forestiers. *« On ne savait pas comment les champignons prélevaient les nutriments et les transféraient aux arbres »*, précise Pascale Frey-Klett, directrice de l'unité interactions arbres-micro-organismes de l'INRA, poste occupé auparavant par Francis Martin.

Dès lors, le biologiste ne cesse d'élargir son sujet. *« Très curieux, il s'est intéressé entre autres à l'expression des gènes des arbres et champignons au cours du développement de leur symbiose, et à des questions d'ordre écologique, comme la diversité des communautés de champignons forestiers »*, continue Pascale Frey-Klett. Cette évolution est liée de près à la passion du chercheur pour les nouvelles technologies. En effet, il importe dans son domaine de recherche des outils provenant de la biologie moléculaire, puis de la génomique. *« Il a notamment introduit l'utilisation des outils de séquençage de l'ADN à haut débit, ce qui l'a conduit à monter au sein de son unité un groupe de spécialistes en génomique et bio-informatique, afin d'analyser de grandes quantités de données »*, ajoute la directrice d'unité. *« Ce groupe est aujourd'hui sollicité au niveau international. »* Tout comme Francis Martin, qui prend part à divers réseaux et comités scientifiques à travers le monde. ■ Antoine Cappelle

Et aussi

Élisabeth Dupont-Kerlan est nommée directrice générale de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques.

Éric Vincent est nommé directeur du réseau thématique de recherche avancée triangle de la physique.

Hans Henrik Rugh est nommé directeur de la fondation mathématique Jacques-Hadamard.

Récompenses

Philippe Sansonetti, directeur de l'unité colonisation et invasion microbienne des muqueuses, à l'Institut Pasteur de Paris, reçoit le Grand Prix Inserm, en reconnaissance de ses travaux de recherche sur la virulence des bactéries, notamment Shigella, responsable de la dysenterie.

Evi Soutoglou, de l'Institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire, à Illkirch, reçoit le prix du Young Investigator, programme de l'Organisation européenne pour la biologie moléculaire. Son équipe bénéficiera d'un soutien financier et d'une aide pratique.

Ingrid Daubechies, de l'université de Princeton, reçoit le prix Frederic-Esser-Nemmers en mathématiques pour l'impact de ses travaux d'analyse computationnelle dans de nombreuses disciplines scientifiques.

Disparus

SERGE RENAUD est décédé le 28 octobre à 85 ans. Chercheur à l'Inserm, il était connu pour son explication du « paradoxe français », montrant le bénéfice d'une consommation modérée de vin dans le cadre de l'alimentation méditerranéenne.

DANIEL STERN, psychiatre américain spécialiste du développement du nourrisson et des interactions mère-enfant est décédé le 12 novembre. Il avait 78 ans.

© ET. INRA BIOLOGY INSTITUTE - ARNAUD BOUISSOU/INRA - DR - CHRISTIAN SLAGMULDER/INRA

Une ville, un champ, deux territoires : la France présente une grande variété d'espaces. © C. CUDRA/IRSTEA

Questions de disparités

Ce cahier est réalisé avec Nathalie Bertrand, animatrice adjointe du thème de recherche Développement territorial et agriculture multifonctionnelle, et les équipes Irstea Grenoble, Clermont-Ferrand et Bordeaux. © DR

Afin de mieux affirmer ses missions, le Cemagref devient Irstea. www.irstea.fr

Des chercheurs en sciences humaines et sociales d'Irstea étudient le développement des territoires français et européens. La question des disparités se pose sous un nouveau jour dans un contexte de stagnation économique et de défis environnementaux majeurs.

Pourquoi s'intéresser aux disparités entre les territoires ? Parce que ces espaces constituent le siège d'interactions, d'échanges et d'évolutions qui concernent aussi bien l'économie, la démographie et la création de ressources que la répartition des noyaux urbains, des zones périurbaines et rurales au sein de l'espace national. « *La question des disparités n'est pas nouvelle,* précise Nathalie Bertrand, économiste au centre Irstea à Grenoble. *Présentées sous l'angle de la diversité, celles-ci peuvent être considérées comme un atout favorisant les complémentarités territoriales, les opportunités de valorisation, la variété des voies de développement. Mais elle se pose de façon différente dans un contexte de faible croissance , où l'attention se focalise sur le lien entre disparités territoriales et inégalités sociales... Nous nous intéressons aux ressorts de développement des territoires, notamment lié aux ressources naturelles et culturelles.* » En France, 60 % de la population, soit 37,8 millions d'habitants, résident au sein même des pôles des grandes aires urbaines, qui représentent environ 10 % du territoire. Le reste de la population se répartit dans des zones périurbaines ou rurales dont les ressources et les dynamiques sont très variées. Qu'il s'agisse de montagne ou de littoral, de proximité ou d'éloignement de centres urbains, les disparités mais aussi les inégalités territoriales s'imposent dans les choix de politiques publiques..., une problématique dont s'est saisi le thème de recherche DTAM (Développement territorial et agriculture multifonctionnelle) à Irstea. « *Nous nous intéressons à la spatialisation de processus économiques et sociaux et à leur interaction avec les enjeux environnementaux,* explique Nathalie Bertrand. *Nos connaissances s'inscrivent dans une perspective d'accompagnement et d'aide à la décision publique.* » Irstea a ainsi contribué en 2011 à la nouvelle typolo-

gie des campagnes françaises de la DATAR[1] qui donne une idée de ces disparités spatiales.

L'ATTRACTIVITÉ DES TERRITOIRES

Les recherches menées à Irstea ont apporté des connaissances sur les ressorts de l'attractivité résidentielle et touristique des territoires ruraux et périurbains. Ainsi,

60 %

des Français résident au sein des pôles des grandes aires urbaines.

des recherches en économie menées sur le développement touristique ont montré l'importance du capital humain, des relations sociales sur les facteurs de localisation d'entreprises de tourisme. À Grenoble, les travaux d'économie spatiale menés sur les dynamiques résidentielles ont montré que les choix de localisation des ménages évoluent en fonction des périodes de la vie, les jeunes recherchant les loisirs de centre-ville, les jeunes couples avec enfants privilégiant les localisations plus périphériques pour l'espace et les ressources environnementales, les personnes âgées se rapprochant des services de santé.

Les travaux menés sur l'attractivité mettent en avant le lien étroit entre fonctionnement et trajectoires des exploitations agricoles et l'entretien et les usages de l'espace. De plus, l'analyse des prix fonciers menée à Bordeaux a souligné l'importance relative de la demande d'accès aux ressources naturelles et patrimoniales comme facteur explicatif du différentiel de rente foncière dans les territoires littoraux.

UNE NATURE « ÉCONOMIQUE »

Au-delà des choix de protection ou de préservation des ressources, le lien entre les dimensions productives des activités et la fourniture de biens non marchands est souligné : usages productifs et services environnementaux pour l'agriculture, ressources et attractivité touristiques, etc… *« Les activités de production dans les espaces ruraux se recomposent aujourd'hui sur d'autres bases,* commente Nathalie Bertrand. *Le développement de la filière bois-énergie illustre ainsi une des nouvelles formes de rapport secteur économique-territoires. »* Qu'il s'agisse de biodiversité forestière ou de littoral, les recherches menées au centre de Bordeaux montrent l'importance des valeurs économiques non marchandes et, sur la forêt littorale aquitaine, celle de la conciliation entre les multiples usages du patrimoine forestier dans des zones à forte attractivité. Du point de vue de la sociologie et des sciences politiques, les chercheurs s'interrogent sur les processus de « mise en économie de la nature », c'est-à-dire l'attribution d'une valeur marchande… et ses implications sur la dimension démocratique.

Vue aérienne d'un quartier résidentiel de L'Aiguillon-sur-Mer, sur le littoral vendéen.
© PHILIPPE DEVANNE / FOTOLIA.COM

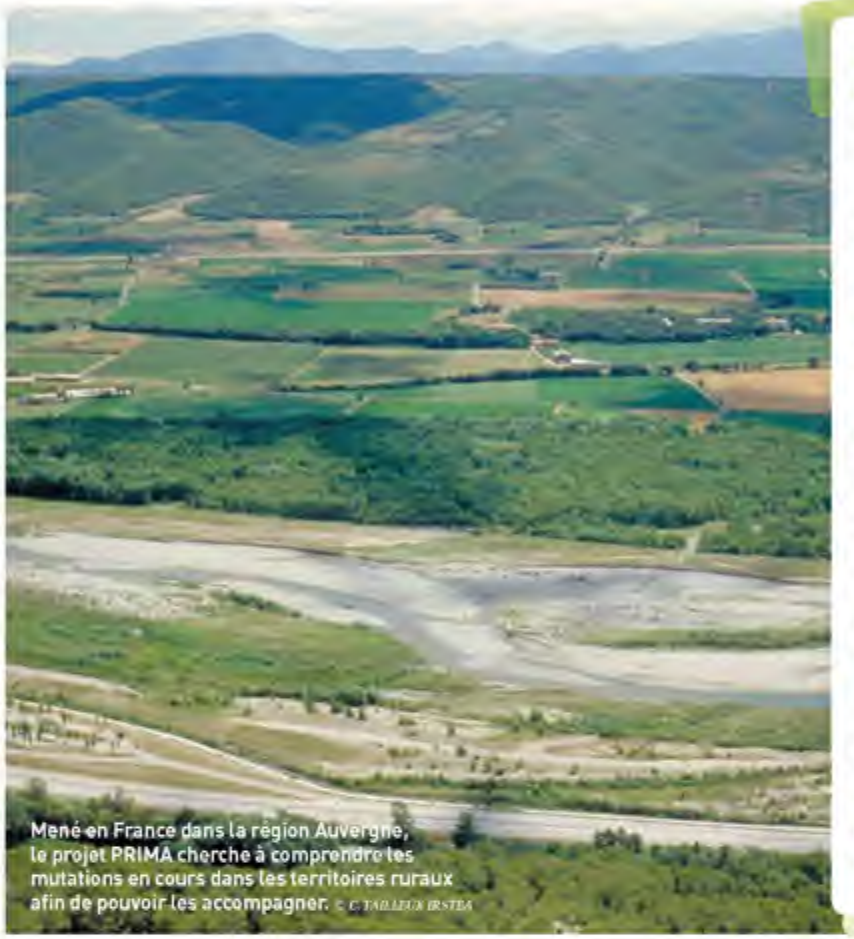
L'ACTION PUBLIQUE À LA LOUPE

Les disparités territoriales conduisent à reconsidérer les politiques publiques du point de vue de leur efficacité et de leur équité. Ainsi plusieurs analyses sur l'impact des politiques pu-

TÉMOIGNAGE

Floor Brouwer, Directeur du département de Recherches sur la gestion des ressources naturelles au LEI (Pays-Bas)
© DR

« J'ai travaillé avec les équipes du centre Irstea de Clermont-Ferrand sur deux projets européens. Le premier portait sur l'agriculture multifonctionnelle. L'institut avait développé une approche très innovante et créative, qui croisait les sciences environnementales et économiques. Les équipes interdisciplinaires savent très bien travailler ensemble. Le travail s'est conclu par un livre dans lequel nous avons élaboré une analyse théorique et une mise en pratique de la gestion des paysages par les agriculteurs français. Dans le cadre d'un second projet, baptisé « Seamless », sur l'agriculture et l'environnement, les chercheurs d'Irstea ont développé de très bons indicateurs pour évaluer l'impact de l'agriculture multifonctionnelle non seulement au niveau des exploitations, mais aussi au niveau régional. Or jusqu'à présent, nous avions peu de résultats à cette échelle, qui relient la production agricole et la production de paysages. »



Mené en France dans la région Auvergne, le projet PRIMA cherche à comprendre les mutations en cours dans les territoires ruraux afin de pouvoir les accompagner. © C. TABLEAU IRSTEA

L'AVENIR DES GRANDS ESPACES

Comment vont évoluer les communes d'une région rurale comme l'Auvergne ? Pour le savoir, les chercheurs du centre Irstea à Clermont-Ferrand ont analysé les données démographiques, sociales et économiques des municipalités auvergnates. Ils ont notamment examiné l'évolution des individus et des ménages (naissances, décès, mises en couple, séparations…), les migrations et les changements d'activité. Cette étude commencée en 2008 s'inscrit dans le cadre du projet européen PRIMA, dont l'objectif est de modéliser ces processus à l'échelle communale afin d'évaluer l'impact des politiques européennes sur le développement territorial en lien avec la multifonctionnalité des espaces ruraux. Cinq autres régions, situées en Angleterre, en Allemagne, en République tchèque, en Croatie et en Bulgarie, font partie du projet.

Site internet :
https://prima.cemagref.fr/

bliques sont menées. À Clermont-Ferrand, les chercheurs ont par exemple montré l'effet des fonds structurels européens, notamment le FEDER, sur les régions en retard de développement et les retombées positives sur la croissance et le PIB visibles sur les zones à proximité. *«Nos travaux ont aussi porté sur les effets des mesures agroenvironnementales territorialisées (MAET) et sur le rôle d'institutions, comme les parcs naturels régionaux, sur le développement local»*, ajoute Nathalie Bertrand. Les effets de la redistribution du revenu entre groupes sociaux (politiques fiscales) sur les inégalités régionales ont aussi été étudiés.

Par ailleurs, des travaux de sociologie sont développés sur le principe de justice et la problématique de l'accès aux aménités* naturelles en lien avec les politiques publiques et leur lien avec les inégalités sociales. Ainsi, lors du suivi de la concertation qui a précédé la création du Parc naturel régional des Calanques *(voir cahier Environnement & démocratie participative,* La Recherche *n°467)*, des sociologues du centre de Bordeaux ont par exemple mis en évidence les différences d'accès à cet espace entre les populations de la région. Mais l'inégalité environnementale s'étend aussi à l'exposition aux risques (sanitaire, technologique ou climatique). Le sentiment d'inégalité des populations concerne plus largement des questions telles que la distance physique par rapport à l'emploi, les cartes scolaires ou encore le financement local des biens publics locaux. *«Un croisement entre inégalités socio-économiques et environnementales constitue pour nous une source stimulante de renouvellement de nos questionnements de recherche et des synergies entre sciences dites "dures" et sciences sociales, entre recherches opérationnelles et fondamentales»*, souligne Nathalie Bertrand. Avec comme préoccupation permanente d'améliorer les connaissances et outils d'analyse qui fondent les choix publics. ■

* Aménités : aspects agréables de l'environnement naturel ou social qui ne sont ni appropriables ni quantifiables en termes de valeur monétaire.

1. Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale.

La station de La Plagne (Savoie), construite dans les années 1960, a initié des travaux de rénovation. © IRSTEA

Les stations de sports d'hiver en plein virage

Alors que le marché touristique et le climat évoluent, les stations de ski doivent faire face à des incertitudes quant à leur devenir. Elles sont gérées différemment selon les modes de gouvernance.

En 2015, la loi Montagne aura trente ans. C'est avec ce dispositif que les quelque 6 100 communes de haute et moyenne montagne, seules ou en groupements, sont devenues responsables de la mise en œuvre des opérations d'aménagement touristique au sein de leur espace. *«Pour les domaines skiables, les communes ont par exemple le choix entre la gestion directe ou la délégation à un opérateur privé,* explique Emmanuelle George-Marcelpoil, qui analyse depuis plus de dix ans l'organisation de ces espaces touristiques à Irstea Grenoble. *Avec la loi Montagne, les questions de partenariat privé-public se sont retrouvées au cœur de l'organisation des stations de ski.»* Les enquêtes de terrain et les recherches au sein de l'institut ont mis en relief les performances et les dysfonctionnements des stations. Le diagnostic a été présenté aux acteurs de la montagne lors d'un colloque organisé en 2004 à Chambéry par Irstea et le CNRS. Ces travaux ont été d'autant plus appréciés que le secteur connaît aujourd'hui des incertitudes liées, entre autres, à la maturité du marché… et au changement climatique. *«Les investissements massifs dans la neige de culture pour faire face aux aléas de l'enneigement ont provoqué de fortes controverses. La consommation d'énergie et la disponibilité de la ressource en eau ont été montrées du doigt – Les Arcs ont par exemple construit une retenue d'altitude de 400 000 m³. Pour les stations de moyenne montagne, la diversification de l'offre touristique est présentée comme un impératif. Nous avons commencé une veille à ce sujet. Les réflexions varient dans chaque station selon l'histoire du lieu, les types de gouvernance et la situation socio-économique et politique.»*

Un système d'informations portant sur les 147 stations alpines a été élaboré à la demande du Commissariat de massif des Alpes. Un atlas a été mis à la disposition des acteurs publics et privés du secteur. *«Un nouvel enjeu pour ces stations concerne l'immobilier loisir ancien et vétuste, inadapté à la demande de la clientèle actuelle,* souligne Emmanuelle George-Marcelpoil. *Nous avons récemment engagé une recherche sur cette thématique afin de disposer de données fiables et robustes mais aussi de comprendre les stratégies foncières locales.»*

3 QUESTIONS À

JEAN-PIERRE CHOMIENNE, Commissaire à l'Aménagement au Développement et à la Protection du massif des Alpes © DR

Quels aspects vous intéressent dans les recherches d'Irstea ?

À la DATAR, nous avons besoin d'une expertise pour argumenter techniquement et politiquement autour de la mise en œuvre des politiques publiques en montagne, notamment pour la loi Montagne de 1985. Les travaux en sciences sociales ou sciences dures d'Irstea nous sont pour cela utiles, car ils ont des applications relativement immédiates et opérationnelles.

Quels sont vos besoins pour votre action au sein des stations de ski ?

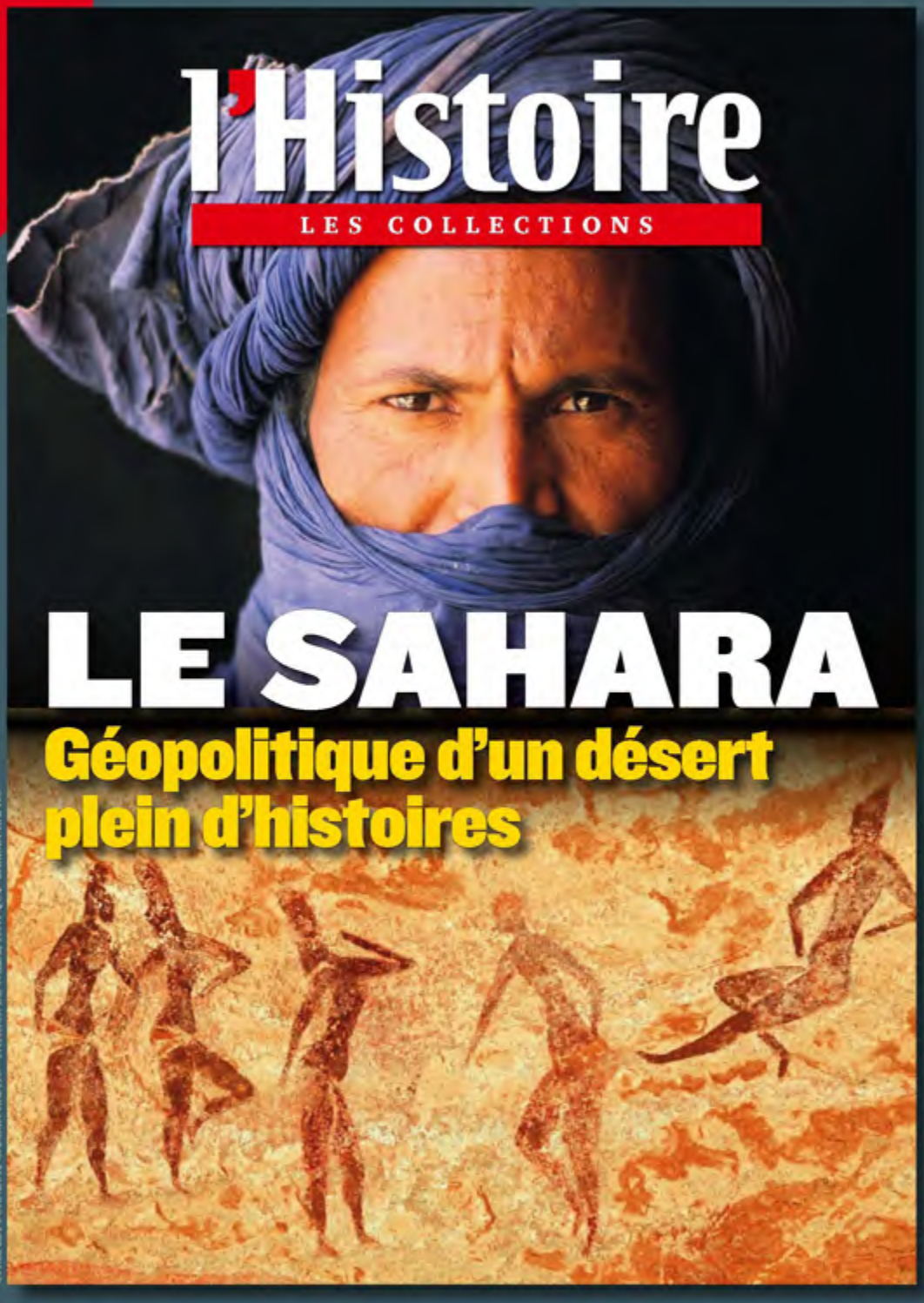
Nous savons que l'activité des stations est menacée par le changement climatique. Mais comment prendre le virage de l'après « tout ski » ? Nous avons besoin pour cela de connaissances approfondies sur la dynamique des territoires touristiques ainsi que de statistiques fiables à leur sujet. Nous devons comprendre comment ils fonctionnent et comment les décisions relatives à leur aménagement sont prises. Irstea nous aide à pointer la lorgnette au bon endroit. Nous avons déjà quelques hypothèses de travail, notamment pour les stations qui ne sont pas sur le marché mondial et seront plus fragilisées par le manque de neige. Elles sont aussi capables de saisir les opportunités liées aux nouvelles attentes des clientèles.

De quels outils disposez-vous ?

Une typologie fonctionnelle complète des espaces touristiques est en cours d'élaboration. C'est un outil d'orientation important pour envisager, par exemple, de reconquérir la saison d'été et proposer des pistes de diversification. Elle nous aide aussi à orienter l'affectation de moyens publics.

Irstea, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
Comité éditorial : Direction scientifique, Direction de la communication-relations publiques Irstea
Rédaction : Myriam Détrey
Conception graphique et réalisation : Anoin

www.histoire.presse.fr



en kiosque dès le 10 janvier

Les 10 dé de

« Fin de traque pour le boson de Higgs » : c'est ce que nous pronostiquions pour 2012, l'an dernier à la même époque. Le 4 juillet en effet, les porte-parole de deux expériences installées sur le Grand collisionneur de hadrons du CERN, près de Genève, ont annoncé la découverte de cette particule fondamentale. Elle figure donc naturellement en première place de notre palmarès des découvertes de l'année. Aux rangs suivants, vous trouverez le décryptage des fonctions de l'ADN humain, bien plus variées qu'on ne le pensait, ou encore la démonstration que des babouins, qui ne parlent pas, peuvent apprendre l'orthographe. Des découvertes qui toutes feront date, nous en sommes persuadés.

© ILLUSTRATION RÉMI MALINGREY

couvertes l'année

1. **Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens**
   par Vincent Glavieux et Olivier Dessibourg p. 40
2. **Le génome humain s'agrandit**
   par Lise Barnéoud p. 46
3. **Des cellules souches qui renforcent la mémoire** par Marine Cygler p. 50
4. **On a enfin décrit *Pikaia gracilens***
   par Philippe Janvier p. 54
5. **Le tore plat carré visualisé grâce à l'informatique** par Vincent Borrelli p. 58
6. **Les singes qui ont appris l'orthographe** par Jacques Abadie p. 62
7. **Vers des lentilles à rayons gamma ?**
   par Viviane Thivent p. 70
8. **Première étape vers la guérison du sida** par Jean-Philippe Braly p. 72
9. **L'expansion de l'Univers est bien accélérée** par Antoine Cappelle p. 74
10. **Le plus vieux bateau du monde**
    par Nicolas Constans p. 76

La technologie de l'année

La nouvelle façon de se poser sur Mars

par Julien Bourdet p. 80

© TU WIEN

Images de science

L'album de l'année

par Jacques Abadie p. 84

1 Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens

Après une traque acharnée de plus de deux ans, les expériences menées au CERN ont révélé l'existence d'une nouvelle particule, fort ressemblante au boson de Higgs.

PAR **Vincent Glavieux et Olivier Dessibourg,** journalistes.

Les trajectoires de particules issues de la désintégration d'un boson de Higgs sont ici observées par le détecteur CMS. Il s'agit de la voie de désintégration qui aboutit à la production de 4 leptons : 2 électrons (traits verts) et 2 muons (traits rouges). © 2012 CERN. FOR THE BENEFIT OF THE CMS COLLABORATION

L'année 2012 aura donc été l'année du boson de Higgs ! Une année historique, à coup sûr, pour la physique des particules. Tombée le 4 juillet, l'annonce de la découverte d'une nouvelle particule au CERN déclenche la liesse des physiciens et l'engouement médiatique [1].

Et pour cause, le nouveau boson possède des caractéristiques « compatibles » avec celles prédites pour la particule que les physiciens traquent depuis trente ans : le fameux boson de Higgs. Imaginée dans les années 1960, cette particule est la clé de voûte du cadre théorique élaboré depuis le début du XX[e] siècle pour décrire les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions, le « modèle standard de la physique des particules ». Pour valider ce modèle, les physiciens doivent donc, à toute force, prouver son existence.

Couronnement. Accomplissement, succès, bonheur, soulagement, les mots ne manquent pas pour saluer le résultat [2]. Cette découverte couronne la réussite des équipes du LHC au CERN, collisionneur géant de 27 kilomètres de circonférence principalement construit pour produire le boson de Higgs. Tout comme celle des collaborations inter-

nationales des expériences Atlas et CMS conçues pour le détecter, fortes de plusieurs milliers de physiciens chacune.

Il n'en fallait pas moins pour espérer déceler une trace du boson de Higgs. Seul le choc de deux faisceaux de protons suffisamment énergétiques (plusieurs téraélectronvolts (TeV) chacun) pouvait en effet produire cette particule. Mais, très instable, le boson de Higgs n'existe qu'une infime fraction de seconde avant de se désintégrer en d'autres particules. L'unique chance de remonter jusqu'à lui est donc d'identifier les particules stables issues des collisions pour repérer s'il s'agit bien de celles découlant des cinq voies possibles de désintégration du boson de Higgs [fig. 1]. C'est donc ce à quoi se sont attelés les physiciens d'Atlas et de CMS, inlassablement pendant plus de deux ans.

Au-delà de la découverte elle-même, ce qui impressionne les physiciens, ce 4 juillet et aujourd'hui encore, c'est l'exceptionnelle vitesse à laquelle ont progressé les deux expériences, en particulier depuis la fin de l'année 2011.

Revenons quelques mois en arrière. Nous sommes le 13 décembre 2011, lors de la conférence annuelle du CERN. Les deux collaborations Atlas et CMS présentent leurs résultats. Il y a déjà des frémissements : elles observent un signal intéressant, qui correspondrait à un boson de Higgs ayant une masse comprise entre 122 à 129 GeV.

Cependant, la prudence règne. Les physiciens sont encore loin de pouvoir annoncer une découverte : ils ne peuvent pas exclure un biais, lié au bruit de fond de l'ensemble des collisions de particules. Pour déclarer une découverte, les physiciens des particules sont soumis à une règle très stricte : leurs résultats doivent atteindre un seuil de certitude de 5 sigmas, soit une probabilité d'erreur dans l'analyse d'un sur trois millions. Or, en cette fin d'année 2011, celle-ci n'est que de 3 sigmas environ pour Atlas et CMS, soit une possibilité d'erreur sur 350 [fig. 2].

Accélération. Comment, en seulement six mois, les deux expériences sont-elles donc parvenues à transformer une forte présomption de l'existence d'une nouvelle particule en preuve ? Il faut rappeler que le calendrier des physiciens était très serré. En effet, dès le 31 janvier 2011, la direction du CERN avait annoncé un arrêt de deux ans du LHC pour travaux et optimisations à la fin 2012. Ils avaient donc deux ans pour produire et enregistrer un maximum de données. En d'autres termes, 2012 devait être l'année du boson.

Pour 2011, les physiciens du CERN jouent la prudence. Ils ont encore en mémoire les problèmes du LHC à son démarrage, en 2008, qui les avaient forcés à arrêter le collisionneur durant un an. Ils maintiennent donc l'énergie de chaque faisceau du collisionneur à 3,5 TeV, soit 7 TeV au total, comme en 2010. *« Cette année 2011 s'est passée sans encombre, la direction du CERN a donc décidé, en février 2012, de prendre quelques risques pour l'année à venir »*, raconte Jorg Wenninger, du département des faisceaux du CERN. Après travaux, l'énergie de collision de chaque faisceau du LHC passe ainsi à 4 TeV, soit une puissance totale de 8 TeV. *« C'est-à-dire une augmentation de 20 % de la probabilité de produire un boson de Higgs »*, traduit le physicien suisse.

Pour ce dernier, la principale amélioration du collisionneur, celle qui a >>>

L'essentiel

> LE 4 JUILLET, les responsables des expériences Atlas et CMS du CERN, à Genève, annoncent la découverte d'une particule qui a les caractéristiques du boson de Higgs.

> C'EST LE TRAVAIL d'optimisation mené sur le collisionneur et sur les détecteurs entre décembre 2011 et mai 2012 qui a conduit à la découverte.

> DEPUIS L'ANNONCE, les équipes d'Atlas et de CMS analysent les propriétés de la nouvelle particule trouvée, et les questions qu'elles posent.

La découverte en six étapes

> OCTOBRE 1964
Prédiction du boson de Higgs, qui expliquerait entre autres pourquoi certaines particules élémentaires ont une masse, et pas d'autres.

> 30 MARS 2010
Le Grand collisionneur de hadrons (LHC), nouvelle machine du CERN chargée de produire le boson de Higgs, débute sa première campagne de collisions.

> JUILLET 2010 et AVRIL 2011
Des rumeurs circulent sur Internet annonçant la découverte du boson de Higgs.

> 13 DÉCEMBRE 2011
Les collaborations Atlas et CMS, chargées de détecter l'hypothétique boson de Higgs dans les collisions du LHC, annoncent les résultats les plus significatifs jamais présentés : la masse de la particule serait comprise entre 124 et 126 gigaélectronvolts (GeV).

> 5 AVRIL 2012
Début de la campagne annuelle de recherche du boson de Higgs, après des optimisations réalisées depuis janvier sur le LHC et sur les méthodes d'analyse des collisions.

> 4 JUILLET 2012
Atlas et CMS annoncent avoir chacun découvert une particule ressemblant au boson de Higgs lors d'un séminaire du CERN auquel assiste François Englert (ci-dessous, à droite), l'un des théoriciens ayant prédit son existence.

© MAXIMILIEN BRICE, LAURENT EGLI/2012 CERN

Fig.1 Deux canaux royaux mais rares

POUR UN BOSON DE HIGGS ayant une masse autour de 125 à 126 GeV, il existe 5 canaux de désintégration. Deux sont appelés « royaux » car ils permettent une mesure plus précise de la masse : celui qui aboutit à la production de 2 photons et celui qui donne 2 bosons Z, puis 4 leptons (à gauche). Ils sont aussi les plus rares : seuls 0,2 % des bosons de Higgs se désintègrent en 2 photons, et 1 % en bosons Z. Le reste passe par les autres canaux et le bruit de fond.

© INFOGRAPHIE RIEN NE VA PLUS

Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens

>>> permis de « faire le grand saut » en 2012, vient toutefois d'ailleurs, de la focalisation des faisceaux. La focalisation des faisceaux est importante pour la luminosité de l'accélérateur, c'est-à-dire le taux de collisions qui se produit, au point d'impact, sur un centimètre carré à chaque seconde. « *Plus les faisceaux sont concentrés, plus ils produisent de collisions* », résume Jorg Wenninger.

En fin d'année 2011, chaque faisceau mesurait 25 micromètres de diamètre au point d'impact. Après un travail sur différentes parties du collisionneur, leur taille est réduite à 18 micromètres début 2012. « *Nous avons ainsi doublé le taux de collisions au centimètre carré* », calcule le physicien.

Des faisceaux plus focalisés et plus énergétiques, cela donne plus de collisions à observer, et donc plus de données. Un nouveau défi à relever pour les équipes d'Atlas et de CMS. Pour gérer au mieux cette augmentation des données, elles ont donc travaillé d'arrache-pied afin d'optimiser leurs méthodes d'analyse.

En « aveugle ». Par ailleurs, les très bons résultats obtenus en 2011 ont permis de réduire la gamme possible pour la masse du boson de Higgs : un signal très intéressant est apparu autour de 124 à 126 GeV [3]. La direction du CERN veut donc éviter tout risque de biais dans le traitement des données 2012 et d'amélioration artificielle des résultats : il ne faut pas se laisser influencer, même inconsciemment, par ce qui a déjà été observé.

D'emblée, une règle est donc imposée : l'amélioration des outils d'analyse doit être menée en « aveugle ». « *Cela signifie que la zone pour laquelle de sérieux indices existent ne doit pas être étudiée avant que l'ensemble des optimisations ne soit entièrement examiné et approuvé par la direction de chaque collaboration* », explique Christophe Ochando, de CMS.

Première phase de ce travail d'optimisation, qui mobilise les équipes d'Atlas et de CMS jusqu'à la mi-mai environ : réanalyser les données de 2011, dont les résultats complets ont été présentés >>>

Question à John Ellis — Que nous dit le nouveau boson de la supersymétrie ?

© MAXIMILIEN BRICE/2011 CERN

JOHN ELLIS est physicien théoricien au King's College de Londres et au CERN.

Selon la théorie de la supersymétrie, à chaque particule du modèle standard, qui décrit le monde de l'infiniment petit, est associée une superparticule, bien plus massive. Mais à ce jour, aucune d'entre elles n'a été observée. La nouvelle particule découverte, le « présumé » boson de Higgs, a une masse de 125 gigaélectronvolts, et pourrait être la pièce manquante du modèle standard. Néanmoins, elle pourrait aussi correspondre au plus léger des 5 bosons de Higgs prévus par la version la plus simple de la supersymétrie, dont la masse est forcément au-dessous de 130 gigaélectronvolts. Un tel boson imposerait que les superpartenaires des gluons et des quarks, les gluinos et les squarks, auraient, eux, des masses plus élevées que prévues jusqu'ici. Cela expliquerait pourquoi ils n'ont pas été observés au LHC. En ce sens, cette découverte n'invalide pas la supersymétrie : c'est déjà une victoire ! Mais avec les données actuelles, on ne peut faire la différence entre ce boson de Higgs de la supersymétrie et celui du modèle standard. Certains prétendent le contraire : ils pensent que les taux de désintégration observés fournissent déjà des informations, mais je n'y crois pas. La traque continue donc pour débusquer d'autres indices validant la supersymétrie. ■ **Propos recueillis par Olivier Dessibourg**

Portrait

Peter Higgs : une paternité qu'il partage volontiers

Dans l'amphithéâtre bondé du CERN, ce 4 juillet 2012, un homme aux cheveux nacrés, au premier rang, essuie une larme. « *J'ai fait la connexion avec la réalité*, glissera-t-il plus tard. *Alors que je m'étais tenu à l'écart de tout cela, je me suis senti concerné émotionnellement.* » Cet homme, c'est Peter Higgs, père du mythique « boson de Higgs », clé de voûte du modèle standard de la physique des particules, dont l'existence vient d'être confirmée. Déjà, lors de son entrée sous les applaudissements, le théoricien écossais cachait mal sa gêne. Lui qui ne cherche jamais à s'arroger, à lui seul, la paternité de ce boson. Lui qui ne souhaite maintenant qu'une chose : recouvrer un anonymat qu'il sait pourtant révolu. D'ailleurs, il ne répond pas au téléphone, ni n'utilise le courriel, tolérant au mieux la bonne vieille relation épistolaire.

Peter Higgs écrit l'équation de la brisure spontanée de symétrie, qui prédit l'existence du boson. Il a eu l'idée de cette formule lors d'une promenade dans un parc, en Écosse.

Sentiment d'iniquité. La conférence achevée, devant notre persévérance, le scientifique nous accorde son unique et court interview du jour. Peut-être le fait-il aussi en souvenir de notre première rencontre, en 2007. Il nous avait alors accueillis à Édimbourg, dans sa pièce de séjour meublée *vintage*, où trône un équipement hi-fi dernier cri, témoin de sa passion pour la musique. Un peu nerveux, il nous avait proposé d'emblée une tasse de thé que nous n'avions jamais goûtée… Car l'interroger sur la physique, c'est s'embarquer aussitôt pour un monde complexe mais fascinant, où théorèmes et formules impénétrables se répondent.

Il se livre tout de même un peu. Physicien à l'université d'Édimbourg, « *je suis passé d'un champ de recherche à l'autre. Au terme de six années, je n'avais pas l'impression d'avoir fait grand-chose* ». Peut-être se serait-il alors réorienté vers la biologie, s'il n'était tombé sur les travaux de Yoichiro Nambu.

Les écueils sur lesquels bute ce théoricien japonais, Peter Higgs va les résoudre en un week-end de 1964, en se promenant dans le parc montagneux de Cairngorms, en Écosse. Un premier article très sobre, 79 lignes et 5 équations (!), est soumis à la revue *Physics Letters*. Puis, peu après, un deuxième, d'abord rejeté. Le physicien y ajoute la description d'une nouvelle particule, servant à matérialiser sa théorie. L'article est accepté par les *Physical Review Letters*. La fantasmagorique particule est née. « *Ce terme de* "boson de Higgs" *est apparu dans les années 1970, à la suite d'une conférence dans laquelle mon seul nom a été cité*, précise-t-il. *Or, deux physiciens belges, François Englert et feu Robert Brout, avaient aussi proposé le même mécanisme. Depuis, je vis avec cette iniquité.* »

Tous les scientifiques débattent alors de cette nouvelle théorie, la développent. Peter Higgs participe au mouvement. Puis, « *il est venu un temps et de nouveaux domaines où je ne me suis plus senti compétent, j'étais perdu. J'ai été chanceux de trouver ce que j'ai découvert. Mais arrive un point où vous prenez conscience que ce que vous faites ne sera plus bon.* » Le chercheur s'est alors consacré à l'enseignement, avant de prendre sa retraite.

Curiosité intacte. En nous raccompagnant à la porte, il s'était arrêté devant une pièce en cuivre : un morceau de l'un des aimants de l'accélérateur LHC. Et le seul objet à lui rappeler la persévérance de milliers de physiciens, depuis des décennies, à débusquer ce fameux boson. Combien de fois ce vieux sage s'est-il demandé s'ils y parviendraient de son vivant ? « *Au début, j'en doutais*, admet-il, ce 4 juillet. *Mais au fur et à mesure que les expériences ont été construites, cette attente est devenue plus réelle.* »

Malgré ses 83 ans, Peter Higgs n'a rien perdu de sa malice, de sa bonhomie, ni de sa mémoire. À chaque rencontre, il égrène les anecdotes sur l'histoire de sa discipline autant que sur sa vie privée. Une adolescence teintée de résignation, chahutée par des crises d'asthme virant à la pneumonie. Une éducation scolaire reçue à son domicile de Bristol. Et une carrière universitaire à Londres puis à Édimbourg. Derrière sa timidité brûle depuis toujours la même curiosité : « *Le propre de l'homme est d'essayer de comprendre* », dit-il à qui lui demande ce qui l'a poussé à creuser ses idées sur le boson.

En revanche, ne l'interrogez pas sur les sujets qui sortent de ses compétences. Quant à expliquer ses travaux avec les mots du quidam, il rosit chaque fois, confus : « *C'est difficile… Il faudrait remonter loin dans l'histoire de la physique, pour poser les bases.* » Il est plus à l'aise pour évoquer l'avenir : « *Les théories allant au-delà du modèle standard vont pouvoir être testées. Il existe peut-être quelque chose qui appartient à une vision plus large.* » Et Peter Higgs de repartir dans un monde où le nom des forces et des physiciens résonnent comme ceux des puissants héros sortis tout droit de l'imaginaire d'un enfant ébahi. ■ **O. D.**

© CLAUDIA MARCELLONI/2008 CERN

Boson de Higgs : la découverte qu'attendaient les physiciens

>>> en mars 2012, aux rencontres de Moriond, en Italie. *« Nous les avons réétudiées en prenant en compte les difficultés supplémentaires induites par la montée en puissance des faisceaux du LHC,* explique Nansi Andari, membre du groupe de recherche sur la désintégration du boson de Higgs en deux photons au sein de l'expérience Atlas. *De cette façon, nous avons déterminé ce qu'il fallait optimiser sur les détecteurs avant de commencer à analyser les données 2012. »*

Les équipes de CMS ont ainsi amélioré de 25 % la calibration* des 88 000 cristaux de tungstate de plomb utilisés dans leur détecteur pour mesurer l'énergie des particules issues des collisions. Tout comme celles d'Atlas, elles ont aussi optimisé les outils pour repérer les particules produites. *« Par exemple, ceux permettant d'isoler les photons provenant de la désintégration d'un boson de Higgs,* détaille Serguei Ganjour, spécialiste de cette voie de désintégration au sein de l'expérience CMS. *En effet, ce type de photon a un niveau d'énergie bien plus faible que ceux issus de la désintégration d'autres particules, ce qui rend donc leur observation plus difficile. »*

Derniers réglages. Les algorithmes de reconstruction de la trajectoire de chaque particule à l'intérieur des détecteurs ont également été raffinés. Prédire, ou calculer, la trajectoire d'une particule est en effet essentiel pour déterminer la particule dont elle est issue. *« Au sein d'Atlas, le perfectionnement des algorithmes a mobilisé plusieurs dizaines de personnes tous les jours, de janvier à avril 2012 »,* se souvient Nansi Andari.

Autour de fin avril-début mai, chaque collaboration avait entériné, et mis en place, toutes les optimisations retenues pour l'analyse des données acquises depuis le 5 avril 2012, jour de démarrage de la campagne annuelle. Cette analyse a commencé vers la mi-mai, et s'est étendue jusqu'à la fin du mois de juin. Une période intense pour tous : *« Je n'ai dormi qu'une heure par nuit tout au long de cette période »,* confirme Nansi Andari.

Et pour cause : l'idée était d'utiliser un maximum de données de 2012 dans les résultats qui devaient être présentés à la grand-messe de la physique des hautes énergies, le congrès Ichep, à Melbourne, en Australie, du 4 au 10 juillet. Ainsi, en quelques semaines, les équipes d'Atlas et de CMS ont analysé près de cinq femtobarns inverses* de données chacune, soit autant de données que sur l'ensemble de l'année 2011 !

En vue du 4 juillet, les équipes d'Atlas et de CMS ont concentré leurs efforts sur les deux « canaux royaux » : celui où, à l'issue d'une chaîne de désintégrations, le boson de Higgs donne 2 photons et celui où il produit 2 bosons Z puis 4 leptons. En effet, ces deux modes sont les plus intéressants car ils génèrent peu de particules « parasites ». Mais ils sont aussi les plus rares : pour 100 bosons de Higgs produits, on estime qu'à peine 1 % se désintègre en 2 bosons Z et 0,2 % en 2 photons !

« On a finalement regardé dans la zone critique, autour de 125 GeV, à partir de la mi-juin, raconte Serguei Ganjour. *Quand on a vu ce qui s'y trouvait, ça a été un grand plaisir, mais il n'y a pas eu de vraie surprise. » « Rien n'était encore sûr »,* nuance Louis Fayard, son homologue au sein d'Atlas. *« Nous étions tous un peu fébriles, surtout quand la force du signal diminuait même un tout petit peu »,* confirme Nansi Andari.

C'est en combinant les analyses des données de 2012 avec celles de 2011, à partir de début juin, que chaque expérience a acquis la certitude qu'elle avait découvert une particule ressemblant au boson de Higgs. *« En décembre 2011, nous manquions de données pour pouvoir parler de*

Question à Géraldine Servant

Que nous indique ce boson sur la matière sombre ?

GÉRALDINE SERVANT, physicienne théoricienne au CERN.

Le nouveau boson ne donne pas d'indication directe sur la nature de la matière sombre, mystérieuse matière qui compose 23 % de l'Univers. Cependant, le fait d'avoir mesuré la masse de cette particule nous guide pour élaborer les modèles cosmologiques : cette valeur limite en effet les propriétés des particules qui pourraient la composer. Les candidates favorites, appelées « mauviettes », raccourci pour « particules massives interagissant faiblement avec la matière ordinaire » (ou WIMPs, en anglais), possèdent une masse de l'ordre de celle du boson découvert (entre 0,1 et 10 fois sa masse). Et on s'attend qu'il existe un couplage entre elles et le boson de Higgs. Ainsi, un déficit d'énergie, à l'issue de la désintégration de ce dernier, pourrait correspondre à la création de bribes de matière sombre. Mais c'est un scénario difficile à étudier. Et, si les premières mesures limitent déjà un peu les possibilités, il faudra attendre 2015, que le LHC tourne à pleine puissance, pour éclaircir cette question avec plus de précision. ■ **Propos recueillis par O.D.**

© MAXIMILIEN BRICE/2007 CERN

***LA CALIBRATION** est un réglage, qui consiste à vérifier que la mesure produite par un appareil correspond bien à une valeur de référence attendue.

*** LE FEMTOBARN INVERSE** est l'unité de luminosité intégrée utilisée pour déterminer la quantité totale de données produites par un accélérateur de particules.

*** LE SPIN** est une propriété quantique d'une particule.

Question à Paul Colas

Que nous dit-il sur la stabilité de l'Univers ?

© D.R.

Paul Colas, chercheur à l'institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers, au CEA, à Saclay.

P.C. Une masse du boson de Higgs à 125 GeV indique que l'Univers peut théoriquement se désintégrer ! Pour comprendre, il faut savoir que le vide possède en lui-même une certaine énergie. Et pour que l'Univers soit indéfiniment stable, cette énergie doit être dans son état minimal. Or, avec la masse trouvée, la théorie indique que ce n'est pas le cas.

Prenons l'image de la balle et du bol : une balle au fond d'un bol illustre un état de stabilité perpétuelle. Imaginons maintenant cette balle en équilibre sur le bord du bol : elle peut à tout moment tomber au fond du récipient, le système est alors dans un état « métastable ». Et quand elle tombe à côté, le système est instable.

Si l'Univers était instable, nous ne serions pas là. Mais il est dans un état « métastable » : il peut donc à tout moment commencer à évoluer vers un autre état. Cette transition consisterait en un changement des propriétés du vide, d'abord localement.

Mais *in fine* les particules perdraient leur masse, et se déplaceraient toutes à la vitesse de la lumière, désintégrant toute forme de matière. Grâce à la nouvelle découverte, on sait désormais que ce phénomène de désintégration du vide devrait se produire d'ici quelques dizaines de milliards d'années. ■

Propos recueillis par O.D.

découverte, rappelle Louis Fayard. *Or, le 4 juillet, chaque collaboration a présenté ses résultats en s'appuyant sur 10 femtobarns inverses de données, soit le double de ce que nous avions six mois auparavant. Le doute n'était plus permis* [4]. »

Précisions nécessaires. Depuis, la pression est un peu retombée. « *Le travail actuel consiste à intégrer les canaux de désintégration qui n'ont pas été pris en compte pour les résultats présentés en juillet*, raconte Marumi Kado, coordinateur d'Atlas. *Dans l'article que nous avons publié en août, nous avons ainsi ajouté celui où le boson de Higgs, après plusieurs désintégrations successives, donne deux bosons W.* [5] » Ceux en paires de quarks beauté et en paires de leptons tau, eux, l'ont été en vue de la conférence sur la physique des collisionneurs de hadrons, prévue à Kyoto, au Japon, mi-novembre 2012 [6].

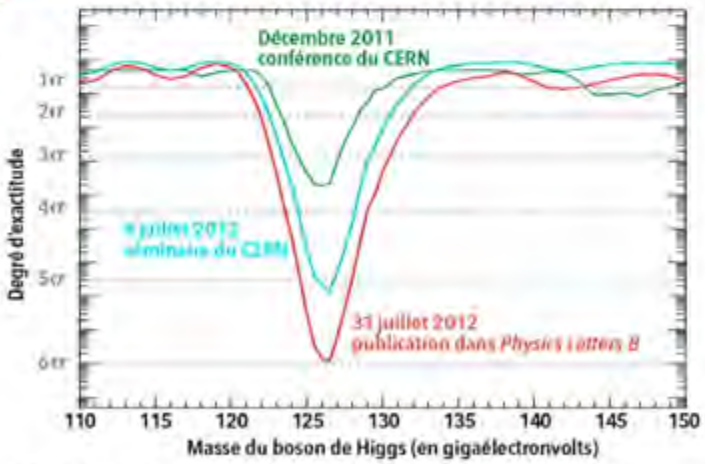
Mais ce qui mobilise surtout les physiciens, c'est le travail sur les propriétés de la nouvelle particule : son spin*, la mesure précise de sa masse, ses interactions avec les autres particules, etc. Deux questions tiennent d'ailleurs la communauté en haleine.

La première : les physiciens de CMS ne détectent pas de signal pour un boson de Higgs autour de 125 GeV dans le canal de désintégration en paire de leptons tau. « *C'est intrigant*, confirme Christophe Ochando, *et problématique, car on a besoin de trouver la particule dans toutes les voies de désintégration pour être certain qu'il s'agit du boson de Higgs.* »

La seconde interrogation concerne Atlas : « *Nous observons un taux de désintégration du boson de Higgs en 2 photons presque deux fois plus important que ce qui est attendu. C'est un résultat étonnant, que nous ne parvenons pas encore à expliquer* », reconnaît Marumi Kado.

Toutes ces interrogations laissent encore l'espoir à certains physiciens que le boson découvert n'est pas le boson de Higgs du modèle standard. « *Assurément, ce serait une nouvelle très excitante*, avoue Marumi Kado. *Mais nous serions aussi heureux si ce n'était pas le cas.* » ■

Fig.2 De la présomption à la découverte



EN DÉCEMBRE 2011, l'expérience Atlas perçoit des indices de l'existence d'un boson de Higgs autour d'une masse de 124 à 126 GeV (courbe verte). La certitude de ce signal est de 3 sigmas, soit un risque d'erreur sur 350, insuffisant pour parler de découverte. Après l'amélioration des outils d'analyse début 2012, le résultat pour la masse du Higgs s'affine, autour de 126 GeV, et la confiance aussi. En juillet, elle atteint le seuil indispensable à l'annonce d'une découverte : 5 sigmas, soit un risque d'erreur sur 3 millions (courbe bleue) - et même 6 sigmas en août (courbe rouge).

[1] « Boson de Higgs : le pari gagné des physiciens », *La Recherche*, novembre 2012, p. 40.
[2] Pascaline Minet, « *Le boson de Higgs enfin dévoilé* », *La Recherche*, septembre 2012, p. 8.
[3] Sandra de Cecco, « Là où se cache le boson de Higgs », *La Recherche*, juillet 2012, p. 42.
[4] Atlas collaboration, http://tinyurl.com/atlas07042012, 2012 ; CMS collaboration, http://tinyurl.com/cms07042012, 2012.
[5] Atlas collaboration, *Phys. Lett. B*, 716, 1, 2012 ; CMS collaboration, *Phys. Lett. B*, 716, 30, 2012.
[6] Atlas collaboration, http://tinyurl.com/atlas15112012, 2012 ; CMS collaboration, http://tinyurl.com/cms11152012, 2012.

2 Le génome humain s'agrandit

PAR Lise Barnéoud,
journaliste.

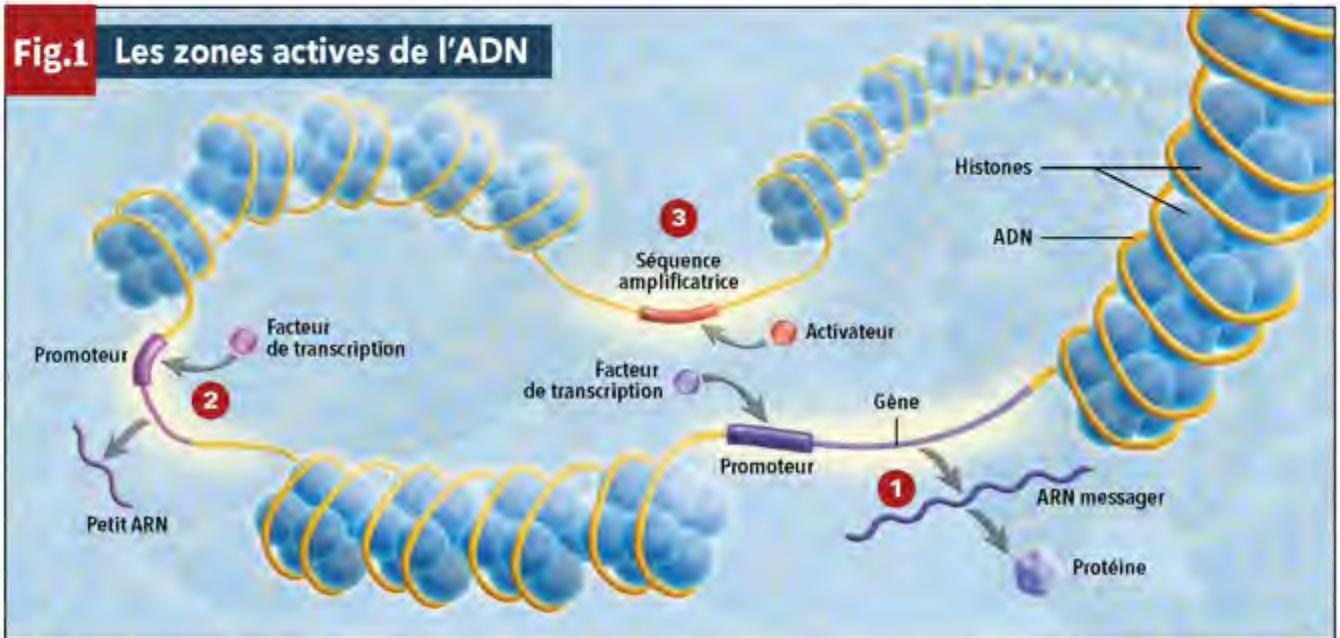
On pensait que 1 % seulement de notre ADN comptait vraiment : la fraction codant les protéines. Mais la première étude d'envergure menée sur l'intégralité du génome humain révèle que 80 % de sa séquence sont actifs.

Le 6 septembre 2012 marquera-t-il un tournant dans l'exploration du génome humain ? C'est ce que l'on pourrait penser à la lecture des trente articles publiés ce même jour et relatant les résultats du programme de recherche Encode (acronyme anglais pour « encyclopédie des éléments d'ADN »). Ce programme, mis sur pied dès la fin du séquençage du génome humain en 2003, a pour objectif de cartographier toutes les fonctions de l'ADN, au-delà des gènes eux-mêmes.

Lorsque le séquençage du génome humain a été achevé, en 2003, la principale conclusion semblait plutôt blessante pour l'orgueil humain. Nous ne possédions en effet qu'à peine 25 000 gènes, qui n'occupaient que 3 % de notre ADN. Nous n'avions ainsi guère plus de gènes que le ver plat d'un millimètre de long *Caenorhabditis elegans*, entièrement séquencé quelques années plus tôt. Pire, ce chiffre initial a été sans cesse revu à la baisse depuis, pour descendre à 21 000 gènes seulement.

« ADN poubelle ». Les clés de notre complexité ne se trouvaient donc pas dans ces séquences dites codantes de l'ADN, celles qui contiennent les messages permettant la synthèse des protéines. Où les chercher alors ? Rapidement, les scientifiques qui dirigeaient le programme de séquençage ont décidé de se pencher sur les autres séquences d'ADN, celles qui ne codent pas de protéines et que les biologistes qualifient couramment d'« ADN poubelle ».

Fig.1 Les zones actives de l'ADN



LES SÉQUENCES ACTIVES RECHERCHÉES lors du projet Encode comprennent toutes les séquences transcrites en ARN, qu'il s'agisse d'ARN messagers traduits en protéines (1) ou de petits ARN (2), dont le rôle reste à déterminer. Elles comprennent aussi les promoteurs, situés juste avant ces séquences transcrites, et auxquels se fixent des facteurs de transcription. Elles incluent enfin les séquences dites « amplificatrices » (3), qui régulent l'expression de gènes situés à distance dans l'ADN, grâce au repliement de ce dernier.

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

Pour cela ils ont constitué le projet Encode. Depuis 2003, près de 450 chercheurs y contribuent. Ils sont issus d'une trentaine de laboratoires, principalement des États-Unis, mais aussi de Grande-Bretagne, d'Espagne, du Japon, de Suisse et de Singapour – la France en est absente. Leur objectif : répertorier toutes les séquences actives de l'ADN et les localiser précisément le long de nos 23 chromosomes. Ils ont donc livré un premier ensemble de résultats en 2012. Leur conclusion principale surprend par son ampleur : plus de 80 % de notre génome présentent une activité biochimique. L'« ADN poubelle » est donc bien plus actif que prévu, et ne mériterait pas une appellation aussi dévalorisante.

Voilà plus d'un demi-siècle que les scientifiques cherchent dans nos gènes les clés de notre identité et de l'hérédité. Lorsque le biologiste britannique Francis Crick élabore la théorie du transfert de l'information de l'ADN vers les protéines, l'élucidation de ces mystères semble à portée de la main. Les gènes n'étaient jusqu'alors qu'un concept théorique, forgé par le botaniste danois Wilhelm Johannsen cinquante ans plus tôt. Ils deviennent quelque chose de concret : une succession d'entités chimiques, les bases, dont il existe quatre modèles différents (adénine, thymine, cytosine et guanine). Quand on suit un brin d'ADN, on rencontre une suite de bases. Ces bases s'organisent par paire, ce qui lie ensemble deux brins, enroulés en une double hélice.

Pour que le code porté par les bases soit lu, il faut que les deux brins se séparent localement. Démarre alors le processus de « transcription » : des enzymes recopient la portion d'un des brins d'ADN, fabriquant une molécule d'ARN messager. Cet ARN messager est ensuite traduit par d'autres enzymes en une chaîne d'acides aminés, autrement dit en protéines, les briques du vivant. La nature et l'ordre des acides aminés dans les protéines sont complètement déterminés par la succession des bases sur l'ADN. Ainsi, selon cette vision des choses, un gène correspond à une portion définie d'ADN permettant la synthèse d'une chaîne d'acides aminés et donc d'une protéine spécifique.

Toutefois, les progrès de la génétique ont complexifié cette définition classique du gène moléculaire. En particulier, certaines séquences d'ADN ne sont pas utilisées pour fabriquer des protéines. Soit elles ne sont pas lues par la machinerie de la transcription, soit elles sont lues, mais l'ARN ainsi formé n'est pas traduit en protéines. C'est l'ADN non codant.

En 1961, les Français François Jacob et Jacques Monod ont démontré que certaines de ces séquences sont essentielles à la lecture des gènes. Outre les « gènes de structure », qui codent les protéines, il existe ce qu'ils nomment des « gènes régulateurs », qui contrôlent l'expression des premiers. Le reste des séquences non codantes, c'est-à-dire la majorité du génome, a été considéré comme de l'« ADN poubelle », vestiges d'expériences ratées de la nature, ou fossiles de gènes disparus. Ces espaces vides permettaient en outre d'expliquer pourquoi les gènes subissaient moins de mutations qu'attendu : la plupart d'entre elles survenant sur ces immenses séquences non codantes, elles passent inaperçues.

Répertoire biochimique. Le séquençage du génome humain révélait l'importance de cet « ADN poubelle » : il concernait plus de 97 % des 3,2 milliards de nucléotides qui composaient l'ADN humain. Comment imaginer que la sélection naturelle, qui élimine immanquablement au cours de l'évolution tout ce qui n'est pas utile aux organismes, ait conservé autant d'ADN sans objet ? Il devenait urgent de se pencher sur ces séquences. C'est ce qu'a proposé l'Institut national pour la recherche sur le génome humain des États-Unis, avec le programme de recherche international Encode. Son objectif était de répertorier toutes les séquences de nucléotides possédant une activité biochimique, et d'identifier celle-ci.

« *Nous entendons par séquence active tout tronçon de génome traduit en protéine, transcrit en ARN ou avec une signature biochimique reproductible, comme une fixation de protéine ou une structure spécifique des brins d'ADN* », précisent les chercheurs d'Encode [1] [fig. 1]. Au-delà du mécanisme de transcription de l'ADN en ARN, ils ont traqué toutes les interactions existant entre l'ADN et des protéines, ainsi que les modifications de structure de ces longs brins d'ADN. Les unes comme les autres peuvent >>>

L'essentiel

- DEPUIS 2003, un programme international de recherche mobilise près de 450 chercheurs afin d'écrire l'encyclopédie des séquences actives de l'ADN humain.
- PLUS DE 80% du génome humain apparaît actif d'un point de vue biochimique.
- ON NE SAIT toutefois pas encore si toutes ces séquences actives d'ADN possèdent un rôle biologique.

Chronologie du séquençage

> 1987
Premier appareil automatique de séquençage d'ADN.

> 1995
Premier séquençage d'un génome bactérien, *Haemophilus influenzae*.

> 1998
Premier séquençage d'un génome animal, le ver plat *Caenorhabditis elegans*.

> 2001
Publication de la séquence brute du génome humain.

> 2007
Séquençage du génome du scientifique américain Craig Venter.

> 2010
Premier catalogue des variations génétiques entre 2 500 personnes issues de 27 pays.

> 2012
Première encyclopédie des séquences actives de l'ADN du génome humain (Encode).

Le génome humain s'agrandit

>>> moduler la transcription puis la traduction des gènes en protéines.

En outre, comme l'ADN ne se comporte pas de la même façon dans les cellules de nos divers organes (ce qui fait leur caractéristique propre), ces séquences actives ont été recherchées dans 147 types cellulaires différents (cellules du sang, du foie, des os, de neurones, d'embryons, etc.). Au total, les chercheurs ont réalisé pas moins de 1 640 expériences, issues de 24 protocoles standardisés.

Les expériences qui ont mobilisé le plus de chercheurs sont celles qui examinaient quelles séquences d'ADN fabriquaient de l'ARN. Et leurs résultats ont été à la hauteur de cette mobilisation : 62 % de l'ADN sont transcrits en ARN et 94,5 % de cette transcription proviennent de séquences non codantes [2]. Pour identifier ces dernières dans un type de cellule, les biologistes récupèrent d'abord tous les fragments d'ARN qui y sont produits. Puis ils synthétisent les séquences correspondantes d'ADN, par un procédé de « transcription inverse ». Enfin, ils séquencent ces morceaux d'ADN afin de déterminer la succession de nucléotides qu'ils contiennent et de les localiser sur les chromosomes.

Ils ont ainsi retrouvé les ARN messagers, contenant l'information nécessaire à la synthèse des protéines, issus de la transcription de gènes codants. Parmi les ARN dits non codants, qui ne sont pas traduits en protéines, ils ont aussi retrouvé des séquences déjà identifiées. En particulier, on connaissait les molécules d'ARN qui œuvrent au déchiffrage et à la traduction des ARN messagers. Il s'agit des ARN ribosomiques*, qui permettent de lire les ARN messagers, et des ARN de transfert, qui servent de connecteurs entre les bases des ARN messagers et les acides aminés.

Mais ils ont surtout trouvé une multitude d'ARN qui n'ont encore aucun rôle identifié. « *La plupart de ces séquences ont une transcription de bas niveau : elles produisent peu d'ARN et n'avaient pas été vues jusqu'à présent* », justifie Michel Werner, directeur de l'équipe régulation transcriptionnelle des génomes de l'institut de technologie et de biologie du CEA, à Saclay.

Séquences régulatrices. Une autre série d'expériences importante visait à déterminer les séquences d'ADN dites « régulatrices », en référence aux « gènes régulateurs » de Jacob et Monod, sur lesquelles se fixent des protéines, nommées « facteurs de transcription », lesquels régulent la lecture des gènes. Ils peuvent ouvrir les brins d'ADN, lancer la transcription, augmenter ou diminuer la quantité d'ARN messager synthétisé. Jusqu'à présent, les équipes engagées dans Encode ont localisé et décrypté 636 336 séquences régulatrices capables d'être reconnues par un ou plusieurs de ces facteurs de transcription. Ces séquences constituent 8,1 % de l'ensemble de l'ADN, beaucoup plus que ce que l'on pensait [3].

Pour les identifier, les biologistes se sont appuyés sur leur connaissance des facteurs de transcription. À l'aide d'anticorps spécifiques qui détectent et agglutinent ces protéines, ils peuvent récupérer le brin d'ADN sur lequel elles se sont fixées. Il suffit ensuite de le séquencer. Au total, ils ont recherché 119 facteurs de transcription, dans 72 types cellulaires différents.

Parmi les séquences régulatrices, ils ont trouvé des promoteurs : des zones qui contrôlent directement l'expression de gènes placés à proximité dans la séquence d'ADN. Ils en ont identifié 70 000. Ils ont également trouvé des séquences dites « amplificatrices » : elles régulent l'expression de gènes situés parfois très loin dans la molécule d'ADN, grâce au repliement de celle-ci qui leur permet de s'en approcher. Il en existerait plus de 400 000, et la plupart semblent spécifiques d'un type cellulaire.

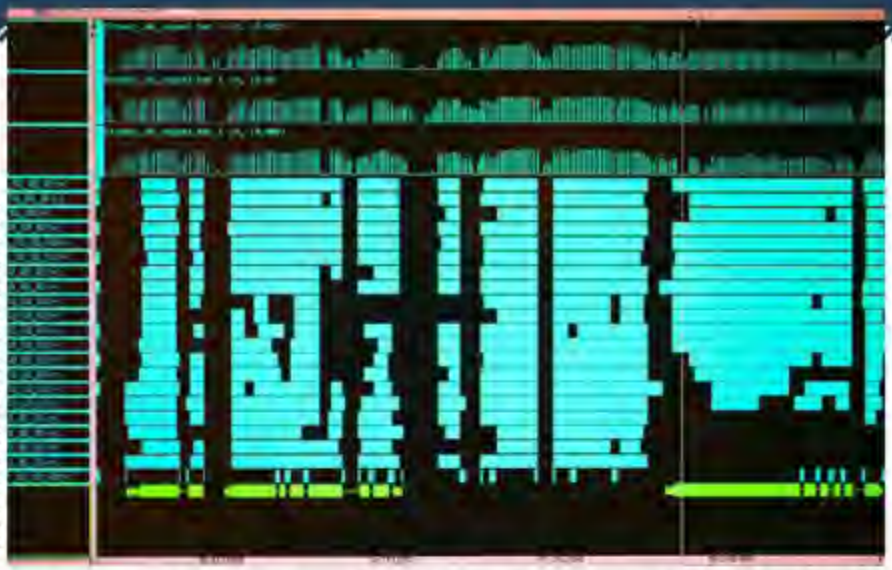
« *Ces chiffres sont une vraie surprise,* commente Michel Werner. *Il y a plus de 3 promoteurs et 20 amplificateurs par gène codant ! Jusqu'alors, seule une minorité des gènes étudiés était connue pour posséder plus d'une séquence régulatrice. Cela démontre l'extrême complexité des processus de régulation des gènes.* » En outre, ces séquences ne sont pas réparties uniformément dans le génome. Il existe notamment des regroupements de séquences sur lesquelles de nombreux facteurs de transcription viennent se fixer.

Ajoutées les unes aux autres, ces différentes séquences d'ADN soit régulatrices, soit traduites en protéines ou simplement transcrites en ARN couvrent 82 %

* **LES ARN RIBOSOMIQUES** sont des molécules d'ARN qui, associées à des protéines, constituent les ribosomes, structures où les ARN messagers sont traduits en protéines.

Une politique de publication inédite

Le 6 septembre 2012, les revues scientifiques *Nature*, *Genome Research* et *Genome Biology* publiaient simultanément une trentaine d'articles relatant les résultats du programme Encode. Trente articles en libre accès, rangés dans une bibliothèque virtuelle (avec application iPad !) et organisés par thématiques : ARN non codant, facteur de transcription, marqueur épigénétique, structure de la chromatine, impact sur le phénotype, etc. Les auteurs des publications d'Encode ont en effet eu une tâche supplémentaire par rapport aux publications scientifiques classiques : sélectionner et résumer les paragraphes de leurs articles possédant un intérêt particulier dans ces différentes thématiques (13 au total). Au lieu de devoir rechercher article par article des résultats spécifiques, les scientifiques peuvent donc accéder directement à toutes les conclusions portant sur leur domaine de recherche, puis retourner aux articles correspondants pour plus de détails. Cette politique de publication inédite offre une lecture simplifiée de la quantité phénoménale de données issues de ces expériences.



© CHESTER HIGGINS JR./THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

Ce diagramme montre, pour 24 échantillons cellulaires différents (de haut en bas), l'activité d'une même séquence d'ADN. Celle-ci est détaillée par des bâtonnets pour 3 échantillons (en haut), et « codée » par des rectangles pour les 21 autres. Elle correspond parfois à la présence de gènes (en vert, en bas).

du génome. Il resterait donc au maximum 18% d'« ADN poubelle » pour lesquels les chercheurs n'ont trouvé aucune activité biochimique dans les types cellulaires étudiés, mais il en demeure bien d'autres à explorer.

Rôle biologique. Seulement 10 % des séquences actives d'ADN non codant possèdent pour l'heure un rôle biologique connu : la répression ou l'amplification de l'expression de tel ou tel gène. *« L'objectif d'Encode était de répertorier les séquences d'ADN possédant une activité biochimique, pas d'expliquer leurs fonctions »*, justifie Alexandre Reymond, de l'université de Lausanne, qui participe au projet Encode.

À quoi servent les 90 % de séquences actives restantes ? Pour certains biologistes, les molécules d'ARN non codant seraient rapidement dégradées. Elles ne seraient finalement qu'un « bruit de fond ». *« Je pense qu'une faible partie seulement de ces ARN non codants ont un rôle*, estime ainsi Alain Jacquier, de l'Institut Pasteur de Paris, qui travaille sur l'ADN non codant de la levure. *Cela coûte peu d'énergie de transcrire l'ADN, donc transcrire de façon peu spécifique est intéressant car cela peut offrir plus de flexibilité en termes de régulation, quitte à avoir des ARN qui ne servent à rien. »* Quant aux séquences régulatrices, *« il est probable qu'un certain nombre d'entre elles soient redondantes*, considère Jean Weissenbach, directeur du Génoscope, à Évry, et pionnier de l'exploration des génomes. *J'ai plutôt tendance à penser que cette activité des séquences non codantes n'a aucune conséquence importante sur le plan d'un pronostic vital ».*

D'un point de vue médical effectivement, aucune modification découverte sur ces portions d'ADN non codantes ne s'est encore révélée à l'origine d'une maladie létale, contrairement à certaines mutations identifiées à l'intérieur des gènes codants. Faut-il pour autant conclure à leur inutilité ? Ce serait oublier que 80 % des mutations identifiées jusqu'à présent comme étant liées au développement de maladies multifactorielles (diabète, obésité, maladies cardio-vasculaires, etc.) se trouvent sur ces séquences non codantes étudiées par Encode.

« On ne sait toujours pas comment ces mutations agissent, mais force est de reconnaître que la grande majorité du génome sert à quelque chose. Il faut abandonner la notion d'ADN poubelle », analyse Philippe Froguel, de l'unité génomique et maladies métaboliques à l'institut de biologie de Lille. *« L'idée de zone morte dans le génome est définitivement battue en brèche par ces publications*, renchérit Michel Morange, professeur de biologie et d'histoire des sciences à l'École normale supérieure. *Cela ne signifie pas que cet ADN non codant soit aussi important que le reste, mais cela change notre vision des choses. »* En particulier, ces résultats modifient la conception du gène. Pour les auteurs d'Encode, l'unité fondamentale du génome, la base de l'hérédité, devrait désormais être la molécule d'ARN, et non plus le gène « classique » [4].

Mais que faire si certains de ces ARN n'ont aucune fonction ? *« Il arrive effectivement que ce soit le cas, aussi bien chez l'homme que chez la levure ou les bactéries. Cependant, la transcription de ces ARN peut, elle, jouer un rôle. Par un phénomène encore flou, elle peut inhiber la lecture d'autres gènes »*, remarque Alain Jacquier, complexifiant encore un peu plus cette tentative de cataloguer les éléments fonctionnels du génome.

Une chose est sûre : en écrivant cette encyclopédie des éléments d'ADN, les biologistes viennent d'entamer un travail titanesque. Car après l'observation de ces éléments fonctionnels viendra la compréhension de leur rôle. C'est l'objectif de la prochaine phase de recherche du projet Encode. ■

Encode en chiffres

> 185 millions de dollars, essentiellement financés par les fonds fédéraux américains de l'Institut national pour la recherche sur le génome humain.

> 442 chercheurs impliqués issus de 32 laboratoires, des États-Unis mais aussi de Grande-Bretagne, d'Espagne, du Japon, de Suisse et de Singapour.

> 147 types cellulaires étudiés.
> 1 640 expériences.
> 80 % du génome actif.
> 20 687 gènes codants des protéines.

[1] The ENCODE Project Consortium, *Nature*, 489, 57, 2012.
[2] S. Djebali *et al.*, *Nature*, 489, 101, 2012.
[3] M. B. Gerstein *et al.*, *Nature*, 489, 91, 2012.
[4] E. Pennisi, *Science*, 337, 1159, 2012.

Pour en savoir plus

> www.nature.com/encode
Le site que la revue ***Nature*** a consacré à Encode.

3 Des cellules souches qui renforcent la mémoire

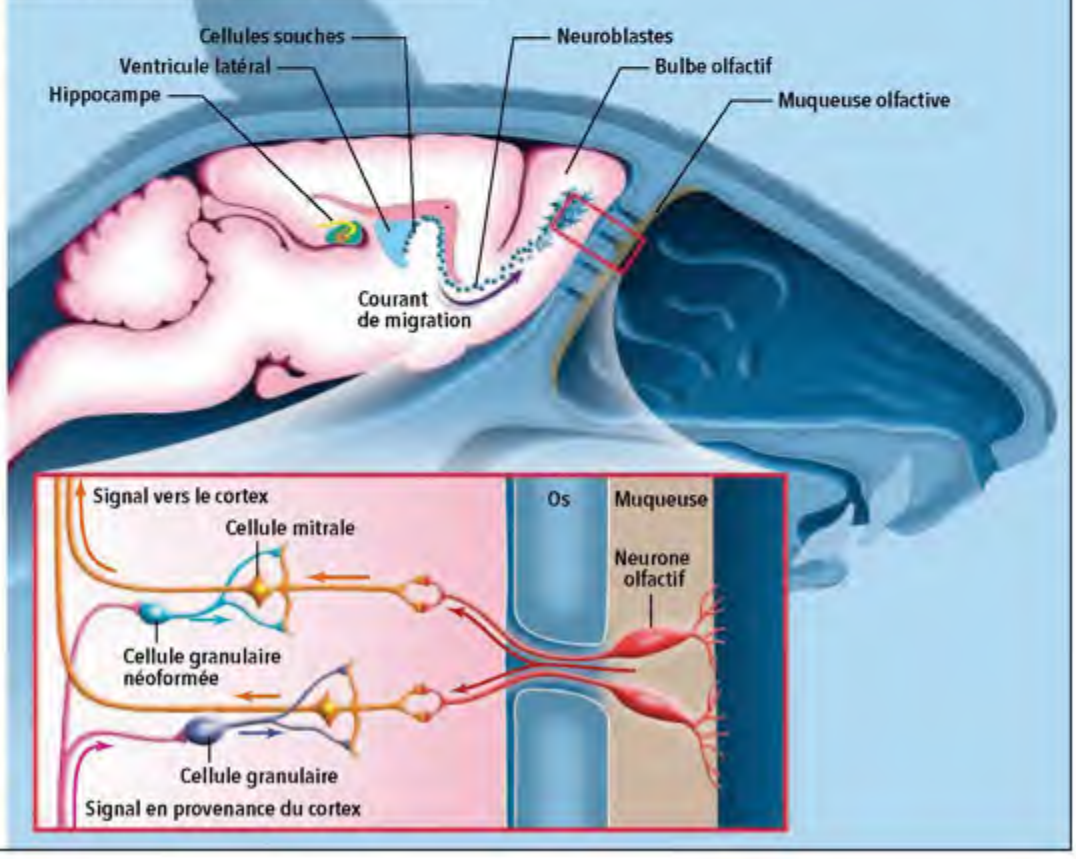
On ignorait à quoi servaient les nouveaux neurones qui se forment dans le cerveau des mammifères adultes. Une équipe de l'Institut Pasteur vient de prouver que certains d'entre eux améliorent la mémoire et l'apprentissage olfactifs.

PAR **Marine Cygler,** journaliste.

Des milliers de nouveaux neurones apparaissent chaque jour dans le cerveau adulte. Décrit chez le canari au début des années 1980, ce phénomène de neurogenèse a ensuite été mis en évidence chez les rongeurs puis chez l'homme au cours des années 1990. Cette découverte a rendu caduque l'idée selon laquelle le nombre de neurones était

Fig.1 Origine et rôle des nouveaux neurones

DEUX ZONES du cerveau adulte sont riches en cellules souches. L'une est située dans l'hippocampe, l'autre se trouve le long des ventricules latéraux (en bleu). Les cellules souches issues de cette dernière évoluent en neuroblastes qui migrent vers le bulbe olfactif. Là, ils se différencient en neurones. Les nouveaux neurones (en bas, en bleu) sont des cellules granulaires. Comme celles présentes à l'origine (en violet), ils sont en contact avec des cellules mitrales (en orange), qui transmettent le signal olfactif vers le cortex. Ils synchronisent l'activité des cellules mitrales lorsque l'animal est confronté à une tâche d'apprentissage olfactif complexe.



© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT

maximal à la naissance, et ne pouvait que décroître ensuite.

Mais à quoi ces nouveaux neurones servent-ils ? On suspectait qu'ils interviennent dans l'apprentissage et la mémorisation. Pierre-Marie Lledo et ses collègues de l'Institut Pasteur et du CNRS viennent de le prouver : chez la souris, les nouveaux neurones améliorent la capacité des animaux adultes à discriminer des odeurs inconnues très proches, et à s'en souvenir [1].

Zones germinatives. Dans le cerveau des mammifères adultes, les nouveaux neurones apparaissent dans deux zones : le bulbe olfactif et l'hippocampe [fig. 1]. Ils descendent de cellules souches situées à plus ou moins grande distance, dans deux zones « germinatives » bien délimitées. Lorsqu'elles se divisent, ces cellules souches produisent chacune une nouvelle cellule souche et une cellule appelée précurseur, qui se différencie en neuroblaste. Ceux-ci entament une migration à l'issue de laquelle ils se différencient en neurone. De leur zone germinative au bulbe, les neuroblastes parcourent 4 millimètres chez la souris, et 3 centimètres chez l'homme !

Or, le bulbe olfactif et l'hippocampe ont un point commun : ils sont impliqués dans les processus mnésiques. Le bulbe olfactif joue un rôle essentiel dans la mémoire olfactive. Tandis que l'hippocampe est un acteur central de la mémoire épisodique, celle qui correspond aux épisodes personnellement vécus par un individu à un moment et en un lieu précis.

Des neurones âgés de 3 semaines sont visibles (en vert) sur cette coupe du bulbe olfactif d'une souris adulte de 1 an, observée au microscope à fluorescence. Toutes les cellules plus anciennes sont en bleu.

L'essentiel

> DE NOUVEAUX NEURONES apparaissent régulièrement dans le bulbe olfactif de souris adultes.

> LEUR SURVIE AUGMENTE lorsque les animaux apprennent à discriminer des odeurs similaires.

> CES NÉONEURONES facilitent l'apprentissage des tâches olfactives complexes en inhibant de façon synchrone des neurones préexistants.

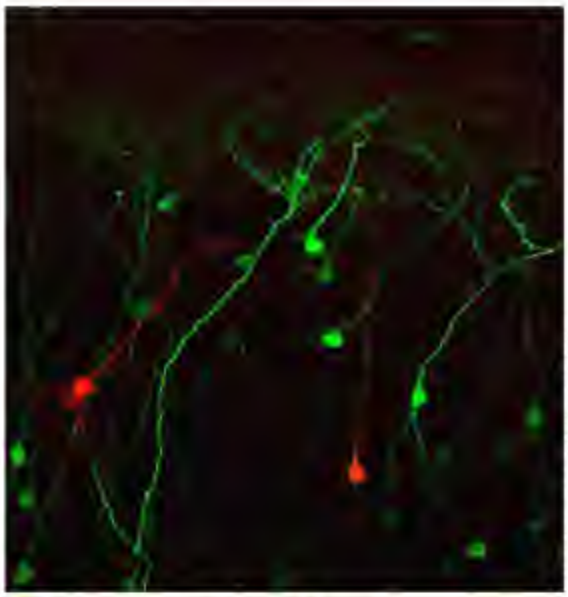
Taux de survie. *« Le bulbe olfactif et l'hippocampe jouant tous deux un rôle important dans une forme ou une autre de mémoire, il était logique de supposer que les néoneurones adultes intervenaient dans ce processus cognitif »*, explique Serge Laroche, du centre de neurosciences de l'université Paris-Sud, spécialiste de l'hippocampe. Au début des années 2000, cette hypothèse a été renforcée par différents travaux. Par exemple, lorsque des souris étaient élevées dans un environnement enrichi en odeurs, leur bulbe olfactif acquérait deux fois plus de nouveaux neurones que celui de souris élevées dans des conditions standards, et leur mémoire olfactive était bien meilleure [2]. *« Mais il ne s'agissait que d'une corrélation,* souligne Serge Laroche. *Ces résultats ne prouvaient pas un lien de cause à effet. »*

Comment mettre en évidence le rôle des nouveaux neurones ? Différents travaux indiquaient que, chez le rongeur, seule une partie d'entre eux survivait. Si l'on arrivait à comprendre pourquoi, peut-être cela fournirait-il aussi une indication quant à leur rôle. Aussi l'équipe de Pierre-Marie Lledo s'est-elle lancée sur cette piste.

« Entre 2002 et 2006, nous avons obtenu différents résultats montrant que le taux de survie des néoneurones augmente quand la souris vit dans un environnement enrichi sur le plan olfactif », indique Pierre-Marie Lledo. Tout >>>

© M. ALONSO, P.-M. LLEDO/INSTITUT PASTEUR

Des cellules souches qui renforcent la mémoire



© M. ALONSO, P.M. LLEDO/INSTITUT PASTEUR

Toutes ces cellules sont des néoneurones du bulbe olfactif. Celles en rouge sont âgées d'une semaine, et celles en vert, d'un mois.

>>> portait donc à croire que la survie des nouveaux neurones dépendait de l'activité sensorielle, donc de la stimulation des détecteurs sensoriels situés au niveau de la muqueuse olfactive. *« Mais après avoir réalisé des tests de comportement en confrontant les souris à différentes odeurs présentées dans différents contextes,* poursuit Pierre-Marie Lledo, *nous avons pris conscience que l'activité sensorielle ne suffisait pas. En fait, la survie des néoneurones augmentait quand les souris se trouvaient dans un contexte d'apprentissage olfactif. Par exemple, lorsqu'elles devaient apprendre à discriminer des odeurs similaires. »*

En parallèle, d'autres équipes avaient montré que la capacité à discriminer des odeurs augmentait lorsque certaines cellules du bulbe olfactif étaient inhibées. Ces cellules inhibées portent le nom de cellules mitrales. Ce sont elles qui reçoivent les messages sensoriels provenant de la muqueuse olfactive, et qui les transmettent au cortex. Quant aux neurones qui les inhibent, il s'agit essentiellement de neurones appelés « cellules granulaires ». *« Or, il se trouve que la plupart des neuroblastes qui atteignent le bulbe olfactif se différencient en cellules granulaires,* explique Pierre-Marie Lledo. *Nous avons donc émis l'hypothèse que ces cellules granulaires nouvellement formées seraient à l'origine des capacités de discrimination accrues. »*

Facultés d'apprentissage. Les neurobiologistes de l'Institut Pasteur ont alors entrepris de réaliser des tests comportementaux tout en stimulant spécifiquement les nouvelles cellules granulaires, et seulement elles. Ils ont pour cela utilisé la méthode la plus précise qui soit à l'heure actuelle : l'optogénétique. Elle consiste à injecter dans des cellules un gène codant une protéine sensible à la lumière, ce qui permet de stimuler ensuite ces cellules par un flash lumineux. En l'occurrence, les chercheurs ont injecté un gène codant une protéine sensible à la lumière bleue dans les neuroblastes en cours de migration vers le bulbe, et ont implanté une diode électroluminescente dans ce dernier. Quand la diode électroluminescente émettait de brefs flashs de lumière bleue (de 5 millisecondes), les néoneurones – et eux seuls – étaient activés.

Dans un premier temps, les chercheurs ont vérifié que la majeure partie des cellules activées par le flash lumineux était bel et bien des cellules granulaires nouvellement formées. Puis ils ont étudié les facultés d'apprentissage de souris adultes réparties en deux groupes. Dans l'un, les souris étaient appareillées avec une diode électroluminescente permettant de stimuler les néoneurones. Dans l'autre, elles ne l'étaient pas.

Il s'agissait pour toutes ces souris d'apprendre à distinguer deux odeurs, et à se comporter différemment en fonction de celle qui leur était présentée : aller chercher une récompense lorsqu'on les mettait en présence de l'une, et ne pas bouger lorsque c'était l'autre. Leur capacité à apprendre était évaluée par le nombre de fois où il fallait leur présenter ces deux odeurs avant qu'elles parviennent à adopter systématiquement le bon comportement.

Une première expérience a consisté à leur présenter deux odeurs très différentes, comme la menthe et l'anis. Les animaux devaient apprendre à aller chercher une récompense en présence de menthe, et à ne pas réagir en présence d'anis. Cette tâche est facile : les animaux n'ont besoin que de quelques essais pour y parvenir. Dans la seconde expérience, les deux odeurs à distinguer étaient cette fois des odeurs semblables : citron ou citronnelle. La tâche d'apprentissage était donc bien plus difficile.

La neurogenèse adulte en 5 dates

> 1983 : Fernando Nottebohm, de l'université Rockfeller, démontre que dans le cerveau de canaris adultes, de nouveaux neurones remplacent régulièrement d'autres plus anciens qui dégénèrent.

> 1992 : Elizabeth Gould, de l'université de Princeton, met en évidence des néoneurones dans l'hippocampe de rats.

> 1993 : Deux équipes démontrent de façon irréfutable d'existence d'une neurogenèse dans le bulbe olfactif de rats.

> 1998 : Le Suédois Peter Eriksson associé à l'Américain Fred Gage démontrent à partir de tissus humains adultes obtenus *post mortem* que l'hippocampe est le site d'une neurogenèse.

> 2001 : Arturo Alvarez-Buylla prouve que la zone sous-ventriculaire du cerveau humain est riche en cellules souches neurales.

Que s'est-il passé ? Lorsque les odeurs présentées étaient très différentes – menthe et anis –, tous les animaux apprenaient au même rythme, que les néoneurones soient activés ou non. En revanche, lorsque les odeurs présentées étaient similaires, les souris dont les néoneurones étaient activés par le flash lumineux ont appris à les distinguer bien plus rapidement que les autres souris. Douze essais leur ont suffi, contre 28 essais pour leurs congénères. *« Les néoneurones facilitent donc l'apprentissage de la tâche la plus difficile »*, souligne Pierre-Marie Lledo.

Mémoire renforcée. Ce n'est pas tout. Les chercheurs ont également testé la mémoire olfactive de leurs deux groupes de souris : cinquante jours après l'apprentissage initial, les animaux ont dû refaire l'exercice de discrimination des odeurs. Résultat, les souris dont les nouveaux neurones avaient été stimulés pendant l'apprentissage ont mieux distingué les odeurs proches que les souris non stimulées. *« En cela, les néoneurones du bulbe se rapprochent de ceux de l'hippocampe,* commente Serge Laroche. *L'équipe de Susumu Tonegawa, du MIT, aux États-Unis, a en effet montré, en 2012 également, que les néoneurones de l'hippocampe facilitent la distinction entre deux souvenirs proches* [3]. »

Les biologistes de l'Institut Pasteur sont toutefois allés plus loin. La fonction cognitive des néoneurones étant identifiée, ils voulaient comprendre ce qui se passait sur le plan cellulaire. Aussi ont-ils entrepris d'enregistrer l'activité des cellules cibles des néoneurones, les cellules mitrales, pendant que les souris réalisaient les tests comportementaux. L'objectif était d'étudier la façon dont ces cellules mitrales réagissaient lorsque les néoneurones étaient stimulés. Ils ont alors constaté que les néoneurones ne se contentaient pas d'inhiber les cellules mitrales : ils les inhibaient de façon synchrone, à la manière d'un chef d'orchestre qui impose un silence à l'ensemble des instruments.

Comment expliquer que cette inhibition améliore la capacité à distinguer des odeurs proches ? Une hypothèse se dessine. Elle découle d'un constat : les cellules mitrales émettent un signal vers le cortex même lorsqu'elles ne sont pas stimulées par les neurones olfactifs. Certes, ce signal est faible. Mais il n'en est pas moins présent, formant une sorte de « bruit de fond ». S'il n'est pas gênant lorsque les cellules mitrales transmettent les signaux bien distincts induits par des odeurs très différentes, il le devient lorsqu'il s'agit de transmettre les signaux semblables induits par des odeurs similaires. *« L'ensemble de nos données laisse penser que les néoneurones inhibent les cellules mitrales qui ne produisent que du bruit de fond,* explique Pierre-Marie Lledo. *Par contraste, les signaux émis par les cellules mitrales activées par les neurones sensoriels ressortiraient donc plus nettement, permettant ainsi de transmettre un signal clair et cohérent au cortex. »* L'hypothèse est en cours d'investigation. ■

[1] M. Alonso *et al.*, *Nat. Neurosci.*, 15, 897, 2012.
[2] C. Rochefort *et al.*, *J. Neurosci.*, 22, 2679, 2002.
[3] T. Nakashiba *et al.*, *Cell*, 149, 188, 2012.

Pour en savoir plus

> Numéro spécial cerveau : comment notre cerveau se répare, se remodèle, se régénère, *La Recherche*, juillet-août 2007.

Questions à Arturo Alvarez-Buylla

Arturo Alvarez-Buylla, de l'université de Californie à San Francisco, est l'un des pionniers de l'étude de la neurogenèse adulte.

Existe-t-il une neurogenèse chez l'homme ?

A.A.-B. Oui, plusieurs équipes l'ont mise en évidence ces dernières années, à partir de tissus prélevés lors d'opérations chirurgicales, ou en étudiant des cerveaux *post mortem*. On y a retrouvé les deux zones germinatives riches en cellules souches précédemment repérées chez les rongeurs : l'hippocampe et la zone sous-ventriculaire. Prélevées puis mises en culture, ces cellules souches se sont différenciées en neurones matures.

Chez les souris adultes, les néoneurones du bulbe olfactif permettent de discriminer des odeurs très proches. Est-ce aussi le cas chez les humains ?

A.A.-B. En 2007, l'équipe de Maurice Curtis de l'université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande, associée à celle de Peter Eriksson, de l'Institut des neurosciences de Göteborg, en Suède, a démontré que des neuroblastes migrent de la zone sous-ventriculaire vers le bulbe olfactif chez l'homme. Mais il y a un an, ma propre équipe a apporté un nouvel éclairage à partir d'autopsies de cerveaux d'individus décédés entre la naissance et plus de 80 ans [1]. Nous nous sommes aperçus qu'à partir de 18 mois la migration des neuroblastes vers le bulbe olfactif diminue, pour quasiment disparaître à l'âge adulte. Cela a été confirmé par une étude suédoise cette année [2]. Ce n'est pas forcément surprenant, étant donné que l'olfaction est un sens beaucoup moins important pour nous que pour les rongeurs.

Pour autant, vous estimez ce résultat intéressant pour l'homme. Pourquoi ?

A.A.-B. L'espoir demeure qu'un jour on puisse réparer le cerveau avec des néoneurones. Il est donc indispensable de comprendre comment se déroule la neurogenèse, afin d'être capable d'induire ces processus nous-mêmes. Il est aussi capital de comprendre comment les néoneurones s'intègrent au réseau des neurones plus âgés. Le fait que chez la souris, les néoneurones coordonnent toute une catégorie de neurones plus anciens, dans un contexte donné, est certainement la partie la plus fascinante du travail de Pierre-Marie Lledo. ■

[1] N. Sanai *et al.*, *Nature*, 478, 382, 2011
[2] O. Bergmann *et al.*, *Neuron*, 74, 634, 2012

4 On a enfin décrit *Pikaia gracilens*

L'anatomie d'un ancêtre potentiel des vertébrés vivant il y a 500 millions d'années vient d'être détaillée, près d'un siècle après la découverte de ce petit animal.

PAR **Philippe Janvier,**
directeur de recherche au centre de recherche sur la paléobiodiversité et les paléoenvironnements du CNRS, du Muséum national d'histoire naturelle et de l'université Pierre-et-Marie-Curie.

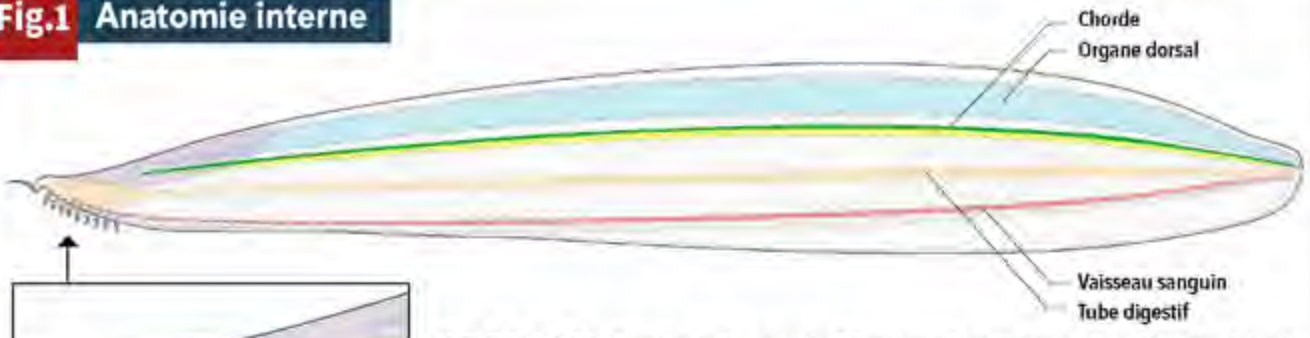
Cent ans ! Il aura fallu attendre cent ans avant que l'un des plus anciens animaux ayant peuplé la planète, l'un des plus célèbres aussi, soit enfin décrit avec précision. En mars 2012, Simon Conway Morris, de l'université de Cambridge, et Jean-Bernard Caron, du Musée royal de l'Ontario, ont en effet livré une analyse extrêmement détaillée de *Pikaia gracilens*, un petit animal d'environ 4 centimètres de long qui vivait il y a 500 millions d'années.

Découvert en 1909, *Pikaia* avait acquis, en 1979, le statut de « plus ancien chordé ». Ce statut était emblématique, car les premiers chordés sont les ancêtres des vertébrés. Ils possèdent en effet une structure, nommée « chorde », qui préfigure la colonne vertébrale, et qui, comme elle, est située en position dorsale par rapport au tube digestif.

Pourtant, la communauté scientifique ne disposait, à l'époque, d'aucune donnée détaillée concernant l'animal. Quelques publications en montraient, au mieux, une photo plus ou moins floue. D'où l'importance de l'étude publiée cette année par Simon Conway Morris et Jean-Bernard Caron, qui permet de reconsidérer la place de *Pikaia* dans l'arbre de l'évolution [1].

Dès sa découverte, *Pikaia* est une source d'interrogations. Lorsqu'en 1909 le géologue Charles Walcott met au jour le gisement des schistes de Burgess, en Colombie-Britannique, au Canada, il

Fig.1 Anatomie interne



VUE DE PROFIL, l'anatomie interne de *Pikaia gracilens* (à gauche, la tête grossie) est caractérisée par un organe dorsal (en bleu) et un élément dorsal semi-rigide (en violet) dont on ignore la fonction. Puis, une chaîne nerveuse qui préfigure la moelle épinière des vertébrés (en vert foncé), et une structure de soutien qui préfigure la colonne vertébrale (en vert clair). L'ensemble des deux constitue la « chorde ». Enfin, en position ventrale, se trouvent un tube digestif (en beige) et un vaisseau sanguin (en rose).

découvre dans ces roches sédimentaires à l'aspect feuilleté, datant de 500 millions d'années, une très grande diversité de fossiles d'animaux marins. Cette faune illustre le phénomène de diversification et d'évolution rapide des animaux au début de l'ère primaire, que les géologues nomment « explosion cambrienne ». Les animaux apparaissent sous la forme d'une compression noire, comme s'ils étaient ramenés en deux dimensions. Ces fossiles sont si bien conservés que les paléontologues peuvent observer de fins détails anatomiques.

Walcott est déconcerté. Car, en plus des fossiles d'animaux à carapace calcifiée ou à coquille qu'il connaît déjà (par exemple, des trilobites), il est aussi confronté à des empreintes d'animaux à corps mou, ressemblant à des vers, à des mollusques ou encore à des éponges. Or, ce type de fossiles ne lui est pas familier. Parmi eux, Walcott remarque en particulier une petite empreinte en forme de feuille de laurier, longue d'environ 4 centimètres. Il nomme cet animal *Pikaia gracilens*, en référence aux pikas, petits lapins aux oreilles courtes qui abondent autour du gisement de Burgess. *Gracilens*, qui signifie « mince » en latin, renvoie à la forme du corps de l'animal.

Pour Walcott, *Pikaia* ressemble à un annélide, autrement dit à un ver marin. Afin de s'en assurer, il consulte Charles Schuchert, paléontologue de l'université Yale, spécialiste des invertébrés. Celui-ci lui répond très rapidement, dans une lettre de mars 1911, que ce fossile ressemble à une espèce actuelle connue depuis le XIX[e] siècle sous le nom d'*Amphioxus* (ou *Branchiostoma*).

Proche parent. *Amphioxus* est un animal fusiforme qui nage par ondulation du corps. En plus d'un aspect général similaire, *Pikaia* partage avec lui deux autres caractéristiques : l'absence d'une tête différenciée du corps, et des muscles disposés en chevrons comme dans les filets d'un poisson. *Amphioxus* appartient à l'embranchement des céphalochordés, l'un des trois embranchements qui, avec les vertébrés et les tuniciers, constituent les chordés. Or, à l'époque, on considère que les tuniciers sont apparus d'abord, puis les céphalochordés, et enfin les vertébrés. *Pikaia* ressemblant à *Amphioxus*, ce serait un chordé proche parent des tout premiers vertébrés.

Cette hypothèse reste relativement discrète jusqu'en 1979, lorsque Simon Conway Morris, alors jeune paléontologue de 28 ans, réétudie les fossiles des animaux à corps mou des schistes de Burgess. Dans le sillage de Walcott et Schuchert, il désigne alors *Pikaia* comme le « plus ancien chordé connu ». L'hypothèse ne porte pas à polémique [2]. Dès lors, elle s'inscrit durablement dans les esprits. D'autant plus que le paléontologue Stephen Jay Gould n'hésite pas à la déformer quelque peu dans son célèbre ouvrage *La Vie est belle : les surprises de l'évolution*, où il présente *Pikaia* comme l'ancêtre des vertébrés [3].

Que nous disent aujourd'hui les nouveaux travaux de Simon Conway-Morris, cette fois associé à Jean-Bernard Caron ? Les deux paléontologues se sont appuyés sur les 114 plus beaux spécimens de *Pikaia*, provenant essentiellement du Musée royal de l'Ontario, et du Musée national d'histoire naturelle de Washington. Un examen poussé réalisé par le biais de différentes techniques d'imagerie leur a permis de décrire >>>

Ce spécimen de *Pikaia gracilens*, l'un des mieux conservés, montre bien la tête de l'animal (à gauche) : elle est pourvue, à l'avant, de deux tentacules et, à l'arrière, de neuf paires d'appendices ramifiés. Lui succède un corps fusiforme. L'animal mesurait 4 centimètres de long.

© IMAGES COURTESY SIMON CONWAY MORRIS AND JEAN-BERNARD CARON

L'essentiel

> ***PIKAIA GRACILENS***, animal vivant il y a 500 millions d'années, a été découvert en 1909 dans le gisement des schistes de Burgess, au Canada.

> EN 1979, le paléontologue Simon Conway Morris propose que cet animal énigmatique soit un ancêtre des vertébrés.

> EN MARS DERNIER, avec Jean-Bernard Caron, il en fournit le premier portrait abouti et reconsidère sa place dans l'arbre de l'évolution.

On a enfin décrit *Pikaia gracilens*

>>> précisément l'anatomie externe, mais aussi interne, de l'animal.

Dans un premier temps, après avoir nettoyé les fossiles, Simon-Conway Morris et Jean-Bernard Caron les ont photographiés sous différents angles. Puis ils ont décapé les couches superficielles des spécimens, de façon à accéder à différentes couches anatomiques. Après avoir recouvert les fossiles ainsi décapés de chlorure d'ammonium, qui permet de faire ressortir les contrastes, et donc les détails, ils les ont observés en microscopie à lumière polarisée. En parallèle, grâce à un type particulier de microscope électronique à balayage*, ils ont réalisé une cartographie élémentaire de la composition chimique des fossiles en carbone, soufre, fer, et phosphate. Se référant à la composition chimique des organes des animaux actuels, ils en ont alors déduit où se trouvaient ces différents organes chez *Pikaia*.

Tête particulière. Aussi sait-on désormais que *Pikaia* était un petit animal à la tête courte, plus ou moins cylindrique, pourvue de deux tentacules (ou antennes) et d'une série de neuf paires d'appendices ramifiés ventraux ou latéraux. La partie dorsale de la tête était sans doute plus rigide que la partie ventrale, grâce à la présence d'une cuticule, couche externe protectrice que possèdent les arthropodes comme les insectes et les crustacés. Cette tête très particulière était reliée à un corps aplati latéralement, le long duquel on distingue la trace d'une chorde dorsale, d'un tube digestif et d'un vaisseau sanguin ventral [fig. 1].

Au vu de cette description, où faut-il placer *Pikaia* dans l'arbre de l'évolution ? Répondre à cette question n'est pas simple tant nos connaissances des premiers vertébrés ont changé en trente ans. En effet, d'autres fossiles à corps mou exceptionnellement conservés ont été découverts en 1984 à Chengjiang, dans la région de Yunnan en Chine. Cette faune ressemble à celle de Burgess sur bien des points, à une différence notable près : on y trouve aussi de très probables vertébrés, en particulier *Haikouichthys*, qui ressemble aux poissons sans mâchoires actuels comme les lamproies [4]. Alors que le gisement de Chengjiang est de 30 millions d'années plus ancien que celui de Burgess !

LA MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE produit des images à haute résolution de la surface d'un échantillon.

Autre changement : les céphalochordés ont perdu depuis quelques années leur statut de « plus proches parents des vertébrés », au profit des tuniciers. Ces animaux, dont le représentant le plus connu est le violet, espèce comestible de la Méditerranée, sont reconnaissables par leur tunique qui leur donne l'aspect d'un sac. En 2006, en comparant les génomes d'espèces de tuniciers, de céphalochordés et de vertébrés actuels, une équipe franco-canadienne a reconstruit les liens de parenté entre ces trois groupes, et a conclu que les tuniciers seraient les « plus proches parents des vertébrés » [5] [fig. 2]. Un *Pikaia* ressemblant à *Amphioxus* ne serait donc pas aussi proche des vertébrés qu'on le pensait.

Mais voilà : à l'issue de leurs récents travaux, Simon Conway Morris et Jean-Bernard Caron ne comparent plus *Pikaia* à *Amphioxus* mais à un fossile du site de Chengjiang, *Yunnanozoon*, animal énigmatique que l'on range souvent parmi les chordés. Selon les deux paléontologues, les muscles de *Pikaia*, initialement considérés comme étant disposés en chevrons, semblent en fait plus verticaux, comme ceux du fossile de Chengjiang. Lequel a aussi, comme *Pikaia*, une tête pourvue de deux antennes ou tentacules. Ce faisant, Simon Conway Morris modère l'hypothèse qu'il avait formulée trente ans plus tôt. *Pikaia* ne serait plus le « plus ancien chordé connu » : il serait situé « quelque part » à la base de l'arbre des chordés, avec *Yunnanozoon*.

Pikaia et *Yunnanozoon* sont-ils pour autant de proches parents ? Pas si sûr. Car la ressemblance entre les deux fossiles est loin d'être évidente pour la majorité des spécialistes de la faune cambrienne. D'une part, la partie antérieure de *Yunnanozoon* diffère morphologiquement de celle de *Pikaia*. D'autre part, on observe chez *Pikaia* d'étranges appendices ramifiés ventraux ou latéraux, absents chez le fossile de Chengjiang. On ignore pour l'instant la fonction de ces structures qui émergent à proximité d'une série de pores, et qui pourraient tout aussi bien être des organes respiratoires ou des appendices locomoteurs. Paradoxalement, ce mystère pourrait être résolu si l'on trouvait des spécimens de moins bonne qualité, en décomposition, par exemple, plus propices à l'observation de leur structure interne ! ■

Fig.2 Liens de parenté

L'ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE des 3 embranchements de chordés (en rouge) a été reconstruit en 2006. Il montre que les plus proches parents des vertébrés sont les tuniciers, et non les céphalochordés comme on le pensait. Ceux-ci sont en fait plus proches des échinodermes.

[1] S.C. Morris et J.-B. Caron, *Biological Reviews*, 87, 480, 2012.
[2] S.C. Morris, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10, 327, 1979.
[3] Stephen Jay Gould, *La Vie est belle*, Seuil, Points Sciences, 2004.
[4] D. Shu et al., *Nature*, 421, 526, 2003.
[5] F. Delsuc et al., *Nature*, 439, 965, 2006.

Pour en savoir plus

> **http://tinyurl.com/pikaia** Une reconstitution tridimensionnelle et animée de *Pikaia*.

> « La valse des espèces », *Les Dossiers de La Recherche*, n° 39, mai 2010.

Complétez votre collection...

La Recherche
L'actualité des sciences

Les anciens numéros

Année 2011

N° 448 janvier 2011
Dossier : Les 10 découvertes de l'année.
Cahier spécial, ce qu'il faut suivre en 2011.

N° 449 février 2011
Dossier : Comment le cerveau apprend.
Événement : la pêche menace-t-elle le thon rouge ?

N° 450 mars 2011
Dossier : La traque de l'antimatière.
Événement : dernier repas chez les ammonites.

N° 451 avril 2011
Dossier : Cellules souches, les promesses de la médecine régénératrice.
Événement : gaz de schiste, une exploitation à risque.

N° 452 mai 2011
Dossier : Mars, sur les traces de la vie
Événement : Le nucléaire civil après Fukushima.

N° 453 juin 2011
Dossier : Nucléaire et risques naturels, l'état des lieux en France.
Événement : Première usine française pour les nanotubes.

N° 454 juillet-août 2011
Dossier : Sommeil et rêves, ce que révèlent les neurosciences.
Événement : Les antirétroviraux limitent la transmission du sida.

N° 455 septembre 2011
Dossier : Un nouveau monde quantique.
Événement : Des organes passent sous contrôle lumineux.

N° 456 octobre 2011
Dossier : Origines de la vie.
Événement : Immuniser des moustiques pour éradiquer la dengue.

N° 457 novembre 2011
Dossier : Le développement de l'intelligence.
Événement : Des neutrinos supra-luminiques interrogent la physique.

N° 458 décembre 2011
Dossier : Vers une gravitation quantique.
Événement : Toucher par la pensée.

Année 2012

N° 459 janvier 2012
Dossier : Le coeur artificiel.
Événement : Le lac sous-glacière Vostok bientôt atteint.

N° 460 février 2012
SPECIAL : Les 10 découvertes de l'année.

N° 461 février 2012
Dossier : La physique de l'invisible.
Événement : Les mystérieuses origines des fossiles de Doushanto.

N° 462 mars 2012
Dossier : Vaincre la douleur.
Événement : Stradivarius, la fin du mythe.

N° 463 avril 2012
Dossier : Epigénétique, l'hérédité au-delà des gènes.
Événement : Controverse autour d'un « supervirus » de la grippe.

N° 464 mai 2012
Dossier : La théorie de la complexité.
Événement : Fertilité, les cellules souches bien cachées.

N° 465 juin 2012
Dossier : Troubles mentaux, l'escroquerie.
Événement : Taux d'acidification record pour les océans.

N° 466 juillet-août 2012
SPÉCIAL : La physique du XXIe siècle.
Événement : La saga de la grotte Chauvet.

N°467 septembre 2012
Dossier : Comment internet modèle notre cerveau.

N°468 octobre 2012
Dossier : Les nouvelles voies de l'immunité.

N°469 novembre 2012
Dossier : Boson de Higgs : Le pari gagné des physiciens.

Les hors-série

- La physique en 18 mots-clés
- Les sciences de la Terre en 18 mots-clés
- 365 énigmes mathématiques
- Spécial Jeux mathématiques
- Le Guide de l'emploi scientifique

Les numéros exceptionnels

- Jeux mathématiques
- La science en 22 mots-clés

Les années complètes

40% d'économie

2002 : N° 349 à 359
2003 : N° 360 à 370
2004 : N° 371 à 381
2005 : N° 382 à 392
2006 : N° 393 à 403
2007 : N° 404 à 414
2008 : N° 415 à 425
2009 : N° 426 à 436
2010 : N° 437 à 447
2011 : N° 448 à 458

Les Dossiers de La Recherche

Année 2008

N° 30 : La conscience
N° 31 : Le défi climatique
N° 32 : La nouvelle histoire de l'homme
N° 33 : L'héritage Darwin

Année 2009

N° 34 : L'intelligence
N° 35 : Le Big Bang
N° 36 : La mer
N° 37 : Le pouvoir des mathématiques

Année 2010

N° 38 : La lumière quantique
N° 39 : La valse des espèces
N° 40 : Le cerveau
N° 41 : Microbes **NOUVELLE FORMULE**

Année 2011

N° 42 : L'héritage Marie Curie
N° 43 : La théorie du tout
N° 44 : Les idées reçues en science et en technologie
N° 45 : Neandertal, notre nouvel ancêtre
N° 46 : La révolution des mathématiques

Année 2012

N° 47 : Les énergies de demain
N° 48 : Dieu et la science
N° 49 : La mémoire
N° 50 : Les plus belles énigmes de la science

Retrouver l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.larecherche.fr et les commander en ligne.

Et pour conserver votre collection précieusement

- l'écrin 12 numéros
  24€ les deux
- l'écrin 18 numéros
  (12 numéros + les 6 Dossiers de la Recherche)
  27€ les deux

Tarifs (frais de port compris)	France TTC	Étranger TTC
Année complète 11 nos	45 €	55 €
Numéros	7,50 €	8,50 €
Dossiers	8 €	9 €
Hors-série	6,50 €	7,50 €
Numéros exceptionnels	8 €	9 €
Écrin 12 nos	13,50 €	16,50 €
Lot de 2 écrins 12 nos	24 €	27 €
Écrin 18 nos	15 €	18 €
Lot de 2 écrins 18 nos	27 €	30 €

Oui, je souhaite recevoir dans les 3 semaines :

Quantité	Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	
	Années complètes : ☐ 2002 ☐ 2003 ☐ 2004 ☐ 2005 ☐ 2006 ☐ 2007 ☐ 2008 ☐ 2009 ☐ 2010 ☐ 2011	Soit ____ €
	Numéro [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ]	Soit ____ €
	Dossiers N° : [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ]	Soit ____ €
	La physique en 18 mots-clés	Soit ____ €
	Les sciences de la Terre en 18 mots-clés	Soit ____ €
	365 énigmes mathématiques	Soit ____ €
	Spécial Jeux mathématiques	Soit ____ €
	Le Guide de l'emploi scientifique	Soit ____ €
	Jeux mathématiques	Soit ____ €
	La science en 22 mots-clés	Soit ____ €
	Écrin 12 nos : [ ] Lot de 2 : [ ]	Soit ____ €
	Écrin 18 nos : [ ] Lot de 2 : [ ]	Soit ____ €
	Total de ma commande	____ €

Bon de commande

À retourner à LA RECHERCHE - BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux
✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 • Fax : 33 (0) 2 38 34 32 23 ✉ Email : ctartivot@wanadoo.fr

V 471

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : [ ][ ][ ][ ][ ] Ville : _____
Pays : _____
E-mail : _____

Je règle aujourd'hui par :

☐ chèque à l'ordre de *La Recherche* ☐ carte bancaire

N° [ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ] [ ][ ][ ][ ]

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : [ ][ ][ ] Expire fin : [ ][ ]

Signature obligatoire :

Votre commande ne sera expédiée qu'à réception de votre règlement.

5 Le tore plat carré visualisé grâce à l'informatique

Une collaboration entre informaticiens et mathématiciens a permis de représenter un tore plat en trois dimensions tout en préservant les distances.

PAR **Vincent Borrelli,**
maître de conférences à l'université Lyon-I.

Cet article est une version adaptée par la rédaction de *La Recherche* du texte *Gnash, un tore plat !*, publié sur le site http://images.math.cnrs.fr

L'image ci-dessus, qui ressemble à une bouée sur laquelle on aurait sculpté des reliefs, n'est pas un dessin quelconque. C'est la représentation graphique exacte d'un tore carré plat en trois dimensions. L'existence d'un tel objet mathématique était connue depuis 1955, mais ce n'est qu'en avril 2012 que nous avons pu en présenter des images tridimensionnelles [1].

Plusieurs années d'effort ont en effet été nécessaires pour les produire. Ce travail a nécessité des compétences variées. D'une part, pour maîtriser le problème mathématique, qui était resté jusqu'ici très abstrait. D'autre part, en informatique et en algorithmique, pour comprendre comment construire effectivement ces images sur des supercalculateurs.

L'histoire commence en 1953. Au laboratoire de mathématiques du Massachussetts Institute of Technology, Warren Ambrose interpelle son voisin de bureau John Nash, futur Prix Nobel d'économie : *« Nash, si tu es si bon, pourquoi ne résous-tu pas le problème du plongement isométrique des variétés riemanniennes* ? »* Il est en effet excédé par les incessantes rodomontades de John Nash, et bien décidé à donner une leçon de modestie à cet impétueux mathématicien. Et le problème qu'il lui propose possède une réputation à décourager les plus téméraires.

Pour le comprendre, prenons un exemple simple de variété riemannienne : le tore carré plat. Dans certains jeux vidéo, les personnages libres de leur mouvement restent néanmoins prisonniers de l'écran. S'ils viennent à disparaître par le haut, ils réapparaissent en bas. De même, s'ils sortent par la droite ils reviennent par la gauche.

Écran déformé. Quelle est donc la forme de l'étrange surface qui les emprisonne ainsi ? Pour en avoir l'idée, il faut déformer l'écran de l'ordinateur dans la troisième dimension : le sol doit être joint au plafond, et le mur de gauche doit s'assembler avec le mur de droite. Au prix d'une sérieuse distorsion du carré, l'architecture globale émerge alors : c'est celle d'une bouée ou, en langage mathématique, d'un tore de révolution.

Cette surface permet de saisir la structure invisible de l'écran, mais elle souffre d'un défaut : elle déforme les distances. Par exemple, les horizontales du carré plat ont toutes la même longueur, alors que, sur le tore de révolution, les latitudes correspondantes ont des longueurs différentes. Le tore de révolution ne donne pas une image fidèle de ce que serait un tore carré plat.

Corriger ce défaut, c'est-à-dire trouver une surface en trois dimensions qui représente réellement le tore carré plat, sans déformer les longueurs, c'est, toujours en langage mathématique, « réaliser un plongement isométrique du tore carré plat ». Une version simplifiée de la gageure de Warren Ambrose pourrait se formuler de façon suivante : *« Nash, si tu es si bon, démontre donc l'existence d'un tore carré plat en trois dimensions qui ne déforme pas les longueurs ! »*

*UNE VARIÉTÉ RIEMANNIENNE est un objet géométrique (disque, sphère, tore, etc.) ayant une structure supplémentaire permettant de définir la longueur d'un chemin entre deux points.

Cette « bouée » parcourue d'ondulations (détail ci-dessus) est un tore plat carré. C'est la surface sur laquelle évoluent les personnages des jeux vidéo qui réapparaissent à droite de l'écran quand ils sortent à gauche. Grâce aux ondulations, toutes les distances sont préservées en trois dimensions.

Non seulement John Nash relève le défi, mais il découvre que les plongements isométriques existent de façon pléthorique dans l'espace à quatre dimensions [2]. Comment procède-t-il ? Au lieu de chercher à corriger directement l'écart à la situation isométrique, ce que l'on appelle le défaut isométrique, il construit d'abord un premier plongement pour lequel ce défaut est divisé par deux. Pour cela, il tord le plongement selon un procédé que l'on appelle désormais la « torsion de Nash » et dont l'idée consiste à remplacer des lignes par des hélices.

Torsion de Nash. John Nash recommence ensuite avec le plongement tout juste construit et en fabrique un nouveau pour lequel le défaut isométrique est encore divisé par deux, et ainsi de suite. On obtient une suite de plongements avec des défauts isométriques de plus en plus petits. Pour le plongement obtenu à la limite, le défaut est réduit à zéro : c'est le plongement isométrique recherché. Et comme la torsion de Nash peut être faite d'une infinité de façons, il existe une infinité de plongements isométriques possibles. Dans la foulée, le mathématicien néerlandais Nicolaas Kuiper améliore le procédé de John Nash en remplaçant les hélices par des sortes de sinusoïdes, ce qui permet une représentation dans l'espace tridimensionnel [3].

Toutefois, ces démonstrations ne permettent pas une manipulation aisée de ces objets. En particulier, elles ne se prêtent absolument pas à une visualisation, car la description se fait à une échelle trop petite. À titre de comparaison, ce serait comme si l'on décrivait une recette de cuisine au niveau moléculaire. Même si cette description est parfaite, elle restera totalement inadaptée pour le cuisinier qui désirerait réaliser la recette : il lui faut de vrais ingrédients !

Les mathématiciens étaient donc dans une situation frustrante : ils savaient qu'il existe une infinité de représentations du tore carré plat mais ils étaient incapables d'en dessiner une seule ! Dans les années 1970 et 1980, Mikhail Gromov, aujourd'hui à l'Institut des hautes études scientifiques, à Bures-sur-Yvette, a commencé à faire évoluer le problème. Il a inventé une technique, l'intégration convexe, qui systématise le procédé de construction de plongements isométriques (lire « L'intégration convexe », p. 60) [4]. Outre une généralisation, cette technique offre également une nouvelle perspective sur les travaux de John Nash et de Nicolaas Kuiper, qui les rend plus immédiatement intelligibles.

Parmi les avantages de cette méthode, il en est un qui, étrangement, est passé inaperçu : son caractère algorithmique. Pourtant, cet avantage ouvrait la voie à la visualisation des plongements isométriques puisqu'il autorisait la programmation informatique de l'intégration convexe. En 2007, ayant présenté cette possibilité lors d'un séminaire, j'ai discuté avec Francis Lazarus, du Gipsa-Lab de Grenoble, et Boris Thibert, du laboratoire Jean-Kuntzmann de Grenoble. Nous nous sommes aperçus qu'en joignant nos compétences nous serions en mesure de mettre en œuvre l'intégration convexe pour représenter un tore plat carré. >>>

L'essentiel

- **ON CONSTRUIT UN TORE** en raccordant deux à deux les côtés opposés d'un carré.
- **LE TORE** est qualifié de « plat » lorsque les distances sont conservées lors du raccordement.
- **DES MATHÉMATICIENS** ont obtenu une visualisation d'un tore plat, soixante ans après qu'une méthode eut été imaginée pour le réaliser.

© V. BORRELLI, S. JABRANE, F. LAZARUS, D. ROMMEL ET B. THIBERT/PROJET HÉVÉA

Le tore plat carré visualisé grâce à l'informatique

Fig.1 La conservation des distances

LES ONDULATIONS ajoutées à la surface du tore allongent les distances de sorte que l'on retrouve celles mesurées sur le carré (en haut). Les lignes tracées suivant différentes orientations sur celui-ci (en couleur) sont ainsi déformées de façon très différentes.

>>> Avec Saïd Jabrane, de l'université de Lyon, nous avons alors démarré le projet Hévéa avec cet objectif.

Après cinq ans de travail, nous avons mis au point un programme informatique qui construit une suite de représentations du tore carré plat s'approchant pas à pas d'un plongement isométrique. Celui-ci est atteint à la limite. Cette suite débute avec un plongement du tore carré plat dans l'espace tridimensionnel qui raccourcit toutes les longueurs. Il est ensuite déformé par une série d'ondulations. Ces ondulations, appelées corrugations ont pour effet de rallonger progressivement les longueurs dans différentes directions jusqu'à réduire l'écart à la situation isométrique.

Aspect d'une fractale. Les corrugations s'ajoutent avec des amplitudes de plus en plus petites et des fréquences de plus en plus élevées, le tout étant calculé pour diminuer le défaut isométrique. Les calculs ont été effectués sur le supercalculateur Rothorn, du Centre suisse de calcul scientifique, ainsi qu'au mésocentre de calcul Ciment, à Grenoble. À la cinquième vague de corrugations, l'amplitude des oscillations est si petite qu'elle devient invisible à l'œil nu. En ce sens, l'image obtenue après quatre étapes représente effectivement un plongement isométrique du tore carré plat. Elle montre comment une surface peut être rendue grumeleuse par l'accumulation des corrugations et garder tout de même un aspect lisse grâce à la décroissance rapide des amplitudes de ces mêmes corrugations.

L'aspect général évoque celui d'une fractale, c'est-à-dire d'un d'objet infiniment fracturé quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe, à cette réserve près qu'ici les fractures sont remplacées par des corrugations. En effet, où que se pose le regard, le plongement isométrique apparaît infiniment ondulé, sans aucune brisure ou arête. Nous avons choisi d'appeler un tel objet géométrique, à mi-chemin entre les fractales et les surfaces lisses ordinaires, une fractale C^{1*}. Informellement, on est tenté de forger un oxymore qui résout l'apparente contradiction entre le grumeleux et le lisse : celui de fractale lisse.

La méthode de construction utilisée offre une grande souplesse, et nous commençons à l'appliquer pour visualiser d'autres surfaces paradoxales. Par exemple, pour représenter ce que l'on appelle des sphères de Nash-Kuiper. Il s'agit de surfaces qui sont obtenues en déformant une sphère de rayon 1 isométriquement – c'est-à-dire sans modifier la longueur des courbes tracées sur cette sphère – de façon à la loger à l'intérieur d'une sphère de rayon plus petit.

D'autres objets attendent également une visualisation, comme les plongements isométriques de l'espace hyperbolique ou ceux d'autres surfaces à courbure constante négative. Ces visualisations restent des opérations délicates, car elles nécessitent de gros efforts d'implémentation et des moyens de calcul très lourds. Elles feront certainement apparaître des structures en fractales lisses, géométrie naturellement engendrée par l'intégration convexe. ■

*LE SYMBOLE C^1 signifie que la surface est partout dérivable une fois et que sa dérivée est continue.

L'intégration convexe

Pour joindre par une route un village situé en fond de vallée à un col de montagne, le tracé le plus simple est la ligne directe allant du village au col. Bien sûr, la route qui en résulte est impraticable, car au-delà d'une certaine valeur de la pente, aucune voiture ne peut l'emprunter. On contourne cette difficulté en ajoutant un grand nombre de lacets au tracé initial. Au final, la route est plus longue, mais elle est praticable et n'est pas très éloignée du trajet direct. En particulier, chaque lacet a le même effet en moyenne qu'un déplacement le long du trajet direct. Cette propriété d'« effet en moyenne » est au cœur de la théorie de l'intégration convexe. Pour le plongement isométrique, la contrainte n'est plus la pente, mais la longueur, et celle-ci est augmentée au moyen, non plus de lacets, mais de corrugations. L'« effet en moyenne » de l'intégration convexe a pour conséquence que la surface obtenue reste proche de la surface de départ : c'est la raison pour laquelle, de loin, le plongement isométrique du tore carré plat et le tore de révolution se ressemblent.

© V. BORRELLI, S. JABRANE, F. LAZARUS, D. ROHMER ET B. THIBERT/PHOTO HÉVÉA

[1] V. Borrelli *et al.*, *PNAS*, *10*, 1073, 2012.
[2] J. Nash, *Ann. Math.*, *60*, 383, 1954.
[3] N. Kuiper, *Indag. Math.*, *17*, 545, 1955.
[4] M. Gromov, *Proc. Intl. Cong. Math*, *2*, 221, 1970.

Pour en savoir plus

› Sylvia Nasar, *Un cerveau d'exception*, Calmann-Lévy, 2001.
› **http://images.math.cnrs.fr/Gnash-un-tore-plat.html**

La boutique de
letudiant.fr

PARTEZ À LA RENCONTRE DE SECTEURS ET MÉTIERS D'AVENIR !

Travailler dans l'environnement ou l'aéronautique vous tente ?

Bâtissez un projet solide grâce à ces 2 guides : explorez chaque secteur, découvrez tous les métiers existants et optez pour la formation la plus adaptée à vos objectifs.

Pilote de chasse, spationaute, contrôleur aérien, agent d'opérations, chef avion…
Ces professions riment avec formations très spécifiques et excellente santé physique : critères à remplir, examens à passer, tout y est !

L'eau, le traitement des déchets, les espaces verts, l'air, le bruit, les énergies renouvelables, la gestion des risques…
L'environnement est aujourd'hui une préoccupation mondiale, porteuse de nombreux métiers et formations.

nos engagements librairie.letudiant.fr

Satisfait ou remboursé

Livraison en 3 à 7 jours

Paiement 100% sécurisé

Un service client à votre écoute

6 Les singes qui ont appris l'orthographe

Des babouins parviennent à différencier visuellement des mots et des chaînes de lettres sans signification. On pourrait donc apprendre l'orthographe sans savoir parler.

PAR **Jacques Abadie,** journaliste.

Un singe qui taperait au hasard sur une machine à écrire pourrait-il rédiger *Hamlet* de Shakespeare ? La probabilité n'est pas nulle, mais très faible : c'est ce que le mathématicien français Émile Borel nomma en 1909 le « théorème du singe savant ». Il avait toutefois sous-estimé les primates en supposant qu'ils frapperaient forcément sur le clavier de façon aléatoire!

Certains singes peuvent en effet faire visuellement la différence entre des mots et des suites de lettres sans signification. C'est ce qu'ont montré en avril 2012 Jonathan Grainger et ses collègues du laboratoire de psychologie cognitive de l'université d'Aix-Marseille et du CNRS, en testant la capacité de babouins à assimiler le code orthographique de l'anglais [1]. Leur étude prouve qu'il est possible d'acquérir un sens de l'orthographe sans avoir une connaissance de la langue orale. Elle renforce une hypothèse récente selon laquelle la capacité à reconnaître des mots écrits mobiliserait des neurones ayant auparavant une autre fonction, neurones qui seraient donc « recyclés » pour la lecture.

Deux théories principales s'affrontent à propos des processus cognitifs de la lecture. Selon la théorie dominante, élaborée dans les années 1980, la capacité à reconnaître des mots écrits dériverait de la parole. Pour un enfant, apprendre l'orthographe consisterait à associer les lettres écrites aux sons de la langue qu'il pratique déjà oralement depuis plusieurs années. Cette théorie s'appuie notamment sur le fait que dans la grande majorité des langues, les symboles écrits correspondent systématiquement aux sons. Par exemple, en anglais, le symbole D est toujours prononcé de la même manière.

Processus indépendant. Une autre hypothèse a cependant été proposée au milieu des années 2000 par Stanislas Dehaene, du Collège de France, et son équipe du laboratoire de neuro-imagerie cognitive de l'Inserm, à Saclay : la lecture serait essentiellement un proces-

Ces babouins, qui vivent dans un enclos près de Marseille, ont librement accès à des bungalows où ils passent des tests cognitifs.

Ce babouin est entré dans un local où se trouve un écran tactile permettant d'évaluer ses compétences en orthographe. Lorsque apparaît une suite de lettres sur l'écran, le singe appuie dessus (à droite). Il doit ensuite choisir entre deux symboles pour indiquer s'il s'agit d'un mot ou pas.

sus visuel indépendant de la parole [2]. Plusieurs travaux ont en effet révélé qu'il existe une zone du cerveau dont la fonction spécifique serait de traiter la forme visuelle des mots écrits (lire « Une zone cérébrale de la lecture », p. 64). Suivant cette seconde hypothèse, l'enfant apprendrait l'orthographe en repérant la régularité avec laquelle certaines paires de lettres se suivent ou ne se suivent pas à l'intérieur des mots. *« Par exemple, en français, il n'est pas rare de voir un T suivi d'un A, mais plus rare de voir un T suivi d'un H,* explique Marie Montant, de l'université d'Aix-Marseille et coauteur de l'étude sur les babouins. *Nous voulions savoir si ces régularités suffisent à développer un sens de l'orthographe ou s'il faut nécessairement connaître au préalable les sons associés aux lettres. »*

Pour le savoir, et départager ainsi les deux hypothèses, il fallait mener une expérience avec des individus qui ne maîtrisent pas le langage humain. *« Les babouins étaient de bons candidats, car leur système visuel est très semblable au nôtre,* signale Marie Montant. *De plus, notre laboratoire possède une station zoologique à Rousset-sur-Arc, près de Marseille, qui accueille essentiellement des babouins. Il s'agit d'une plate-forme unique au monde qui nous permet d'étudier la cognition et le comportement des primates en semi-liberté. »* Une trentaine de babouins y vivent en société. Ils sont entraînés à utiliser des écrans tactiles en libre accès, disposés dans des bungalows en bordure de leur enclos.

Les chercheurs ont sélectionné six de ces singes pour tester leur capacité à assimiler le code orthographique de l'anglais. Leur objectif était de savoir si les animaux pouvaient apprendre à faire la distinction entre des mots anglais de quatre lettres, par exemple « Bang », et des chaînes de quatre lettres dénuées de sens, appelées « non-mots », comme « Kang ». Ils ont donc créé près de 8 000 non-mots relativement proches de mots réels du point de vue orthographique, à ceci près qu'ils contenaient des suites de lettres que l'on rencontre peu fréquemment en anglais.

Leur hypothèse était que si le sens de l'orthographe repose sur des capacités visuelles indépendantes de la parole, les babouins parviendraient à faire la distinction entre mots et non-mots. Comment ? En s'appuyant, implicitement, sur le fait que certaines suites de lettres sont plus fréquentes dans les mots que dans les non-mots.

Récompense. Chaque babouin devait donc réaliser la tâche suivante. Lorsqu'il se trouvait devant un écran, ce dernier affichait soit un mot, soit un non-mot. Puis apparaissaient un cercle et une croix. Le singe devait alors appuyer sur le cercle s'il avait vu un mot, et sur la croix s'il avait vu un non-mot. Quand il donnait la bonne réponse, il recevait en récompense un grain de céréale. Un mot était considéré comme appris lorsque le babouin avait donné plus de 80 % de bonnes réponses au fil des essais.

Au cours de l'expérience, qui a duré un mois et demi, des centaines de sessions ont été organisées. Chacune comprenait, dans un ordre aléatoire, 50 présentations de mots et 50 présentations de non-mots tous différents. Pour permettre aux babouins de comprendre ce que l'on attendait d'eux au début de l'expérience, les mots ont été introduits progressivement. Au cours de la première session par exemple, le même mot a été répété 50 fois, tandis que les 50 non-mots étaient tous différents. Ainsi, pour les babouins, les mots correspondaient aux *stimuli* qui apparaissaient fréquemment sur l'écran. Si au terme de chaque session, le mot nouvellement introduit était correctement reconnu dans 80 % des essais, un nouveau mot était >>>

L'essentiel

> **DES BABOUINS** peuvent apprendre à distinguer visuellement des mots de la langue anglaise et des suites de lettres sans signification.

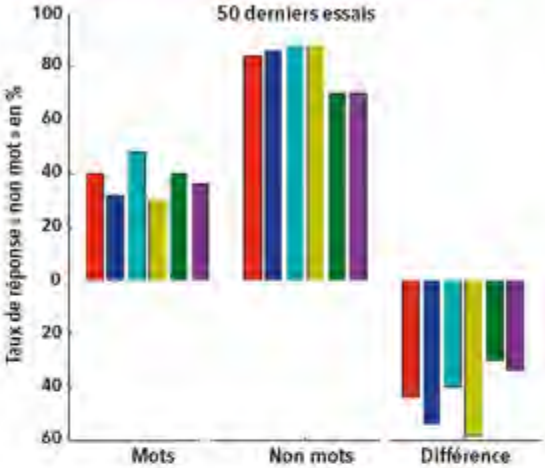
> **CE RÉSULTAT** suggère que l'apprentissage de l'orthographe est indépendant de la connaissance orale de la langue.

> **LA RECONNAISSANCE** des mots écrits serait traitée par des réseaux neuronaux qui avaient auparavant une autre fonction.

© PHOTOS CYRIL FRESILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE

Les singes qui ont appris l'orthographe

Fig.1 Un entraînement pour distinguer les mots



LES CHERCHEURS ont entraîné 6 babouins (couleurs) à distinguer des mots anglais de suites de lettres sans signification ou « non-mots ». À la fin de l'apprentissage, les singes parvenaient plus souvent à classer dans la bonne catégorie une suite de lettres qu'ils n'avaient jamais vue. Ils donnaient moins souvent la réponse « non-mot » face à un mot (à gauche) que face à un non-mot (au milieu). © SOURCE SCIENCE

>>> ajouté à la session suivante, en plus des mots déjà appris.

Ainsi, sur la durée totale de l'expérience, les babouins ont appris à reconnaître, selon les individus, de 81 à 308 mots, avec un taux moyen de bonnes réponses de 75 %. Mieux encore : au fil de l'apprentissage, les babouins se sont mis à faire directement la différence entre les nouveaux mots, qu'ils voyaient pour la première fois, et les non-mots. En effet, lorsqu'un nouveau mot leur était présenté, ils le classaient dans la bonne catégorie dans plus de la moitié des cas : preuve que leur réponse n'était pas donnée au hasard. Les singes ont donc acquis au cours de l'expérience la connaissance implicite d'une règle orthographique simple, l'association préférentielle entre certaines lettres.

Ce « sens » de l'orthographe s'est aussi manifesté dans les réponses données pour les non-mots : les babouins se sont trompés plus souvent avec les non-mots orthographiquement proches des mots, c'est-à-dire qui n'en différaient que d'une lettre (le non-mot « tang » par rapport au mot « bang »), qu'avec ceux qui s'en distinguaient par plusieurs lettres (« targ » par rapport à « bang »). Comme les humains, les babouins sont donc sensibles à ce que l'on appelle la « distance orthographique ». *« Ces résultats confortent mon hypothèse que la lecture repose en grande partie sur l'apprentissage implicite de la manière dont les mots sont écrits, sans relation avec les sons,* estime Stanislas Dehaene. *Autrement dit, nous acquérons une connaissance statistique, purement visuelle, sur les lettres et leurs combinaisons. »*

Neurones « recyclés ». Reste à savoir si, chez les six babouins testés, une aire cérébrale s'est spécialisée dans la reconnaissance des mots écrits. C'est en effet ce que l'on observe chez les hommes qui ont appris à lire. Les circuits neuronaux qui décodent les mots ne sont pas établis dès la naissance. Ils se forment seulement lors de l'apprentissage de la lecture.

D'un point de vue évolutif, la lecture est apparue, et s'est généralisée, trop récemment dans l'histoire de l'humanité pour avoir été sélectionnée : depuis l'invention de l'écriture, il y a 5400 ans en Mésopotamie, le cerveau humain n'a pas eu le temps de s'adapter pour développer une structure spécialisée dans la lecture. D'où la théorie, proposée en 2007 par Stanislas Dehaene et Laurent Cohen, de l'hôpital de la Salpêtrière, à Paris, que les réseaux neuronaux qui décodent les mots auraient une autre fonction avant que nous apprenions à lire : ils seraient « recyclés » [3]. La découverte d'une telle zone chez des babouins ayant appris l'orthographe conforterait cette thèse.

L'étude conduite par Jonathan Grainger et ses collègues offre en tout cas, pour la première fois, un modèle animal permettant d'étudier les bases neuronales de la lecture. Pour Johannes Ziegler, de l'université d'Aix-Marseille et du CNRS, coauteur de l'étude, *« ce modèle permettrait notamment de mieux comprendre les troubles de la lecture dits visuo-attentionnels, qui sont directement liés à une incapacité à traiter en même temps et de manière efficace toutes les lettres d'un mot ».* ■

Une zone cérébrale de la lecture

Au cours des années 2000, plusieurs études ont suggéré qu'il existerait une zone du cerveau humain spécialisée dans la reconnaissance des mots écrits. À l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, des neurologues ont examiné les cerveaux de patients qui ne parvenaient plus à lire mais reconnaissaient d'autres éléments visuels comme les objets, les visages et les chiffres. Résultat : chez tous ces patients, ils ont observé des lésions cérébrales dans une zone précise du lobe temporal de l'hémisphère gauche. Cette zone, baptisée « aire de la forme visuelle des mots », serait donc nécessaire au codage des mots écrits. Une hypothèse confortée en 2006 par l'équipe de Laurent Cohen, à l'hôpital de la Salpêtrière, à Paris : chez un patient épileptique dont les crises provenaient de l'aire de la forme visuelle des mots, les neurologues ont dû procéder à l'ablation de cette zone. Or, après l'opération, le patient n'était plus capable de reconnaître simultanément toutes les lettres d'un mot [1].

[1] R. Gaillard *et al.*, *Neuron*, 50, 191, 2006.
[1] J. Grainger *et al.*, *Science*, 336, 245, 2012.
[2] S. Dehaene *et al.*, *Trends Cogn. Sci.*, 7, 335, 2005.
[3] S. Dehaene et L. Cohen, *Neuron*, 56, 384, 2007.

UNIVERSITÉ DE LYON

EXPLORER LA VILLE DURABLEMENT

Cahier spécial réalisé avec le soutien de l'Université de Lyon.

La ville et le développement durable sont deux thèmes forts de la recherche menée au sein des vingt établissements (universités, grandes écoles) de Lyon Saint-Étienne, regroupés au sein du Pôle de recherche et d'enseignement supérieur (PRES) Université de Lyon.

L'urbanisme et le développement durable sont deux des axes forts de recherche de l'Université de Lyon. Les deux thèmes se rencontrent d'ailleurs souvent. Témoin, l'important programme Lyon Cité Campus concernant huit établissements de l'Université de Lyon. Il vise à réhabiliter 273 000 m² de sites universitaires et à en créer 66 500, dont la moitié dédiée à la vie des campus. Deux sites ont été retenus pour cette opération, pour un budget global de 489 M€. Le premier est le campus LyonTech-la Doua qui, précisément, vise à devenir une référence mondiale en matière de technologies propres en s'appuyant sur les deux domaines d'excellence du site : la chimie et l'ingénierie au service du développement durable. Le second, le campus Charles Mérieux, qui rassemble des établissements et les centres de recherche autour d'un projet commun : la rencontre entre les biosciences et les sciences humaines et sociales.

Une recherche féconde avec de grands acteurs

Nul doute que ce projet bénéficiera de tous les savoirs de l'Université de Lyon en matière d'urbanisme. Ceux issus du laboratoire EVS (Environnement, Ville et Société) membre du LabEx IMU (Intelligences des Mondes Urbains) bien sûr *(voir page 67)*. Mais aussi de toutes les autres entités qui s'attaquent au sujet sous différents angles. Par exemple, le Centre Max Weber, laboratoire de sociologie. Placé sous la tutelle du CNRS, de l'Université Lumière Lyon 2, de l'ENS de Lyon et de l'Université Jean Monnet Saint-Étienne, il abrite notamment l'équipe « Modes, espaces et processus de socialisation », qui consacre l'un de ses deux axes de recherche à la ville, l'habitat et les mobilités. Jean-Yves Authier, son directeur adjoint, est d'ailleurs coauteur d'un livre récent *Sociologie de Lyon* qui, au-delà des stéréotypes – Lyon, ville bourgeoise et froide, jalouse de Paris ; Lyon, ville de la soie… –, examine les dimensions matérielles, économiques, sociales, culturelles et politiques de cette « ville mondiale en formation ».

Autre acteur important, Michel Lussault. Il est géographe, professeur au sein de l'ENS de Lyon et préside, depuis 2008, le PRES Université de Lyon. Il se consacre à la mise en place d'une théorie générale de la spatialité individuelle et à l'épistémologie des savoirs géographiques et urbanistiques, dont il a considérablement contribué à renouveler le paysage en France. Son travail se focalise particulièrement sur la question urbaine. Il développe la thèse

Afin de devenir une référence en matière de biosciences et d'ingénierie du développement durable, Lyon a mis en place le programme Lyon Cité Campus : plus de 460 000 mètres carrés seront ainsi totalement réhabilités et 65 000 mètres carrés de campus construits dans le respect des nouvelles normes environnementales.
© DUMETIER DESIGN

• • •

de l'urbanisation généralisée du monde en mettant en évidence les nouvelles caractéristiques de l'urbain contemporain. L'histoire est elle aussi convoquée pour analyser la ville. Le laboratoire Histoire et Sources des Mondes Antiques (HiSoMa, CNRS, Université Lumière Lyon 2, Université Jean Moulin Lyon 3, Université Jean Monnet Saint-Étienne, ENS de Lyon) s'intéresse ainsi à la problématique «Villes, territoires et processus de territorialisation» et mène par exemple des études de topographie urbaine sur plusieurs sites archéologiques, à Kition (Chypre), Tyr (Liban) comme à Apollonia et Durrës (Albanie).

Concevoir autrement les politiques urbaines

Le master «Altervilles», porté par l'Université Jean Monnet Saint-Étienne, Sciences Po Lyon et IMU, vise à former des professionnels des stratégies et des politiques urbaines : professionnels de la maîtrise d'ouvrage, de l'assistance à la maîtrise d'ouvrage, de la prospective, de l'aide à la décision, de l'évaluation et de la participation. Enfin, on peut mentionner le projet Optimod'Lyon qui vise à traiter l'ensemble des données de la mobilité urbaine sur une plate-forme unique afin de créer des services innovants. Deux laboratoires de l'UdL y participent, le LET, Laboratoire d'économie des transports (CNRS, Université Lyon 2, ENTPE) et le LIRIS (Laboratoire d'informatique en image et systèmes d'information, CNRS, INSA de Lyon, Université Lyon 1, Université Lyon 2, École Centrale de Lyon).

Production et développement durable

Voici un autre axe de recherche très fort à Lyon. Outre l'IDEEL *(voir page 68)*, à l'Institut Henri Fayol de l'École des Mines de Saint-Étienne, les chercheurs travaillent à la mise au point de solutions nouvelles de modélisation, évaluation et analyse des processus industriels et des systèmes territoriaux, et étudient leurs interactions au sein du département PIESO (Performance industrielle et environnementale des systèmes et des organisations). Parmi leurs travaux, un projet original vise à intégrer les technologies de l'information dans des bâtiments afin de réduire de 20% leurs consommations d'eau et d'énergie. Il vise à lier consommation et quotidien en utilisant les TIC*.

Même pluralité au sein du LGCIE, Laboratoire de génie civil et d'ingénierie environnementale (INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1), dont l'objectif est de coupler des recherches en génie civil, chimie et génie des procédés pour améliorer la prise en compte des questions environnementales dans l'aménagement et la gestion des espaces construits.

Bénéficiant du soutien scientifique de l'Université Lyon 1, de l'Université Joseph Fourier-Grenoble, de l'INSA de Lyon et de Grenoble INP, le pôle Ecotox construit un projet ambitieux de 22000m², au service des communautés scientifiques, médicales et des entreprises dans les domaines de la toxicologie environnementale et de l'écotoxicologie. Le nom de l'équipe IPE – Impact des polluants sur les écosystèmes – dit clairement son activité. Cette équipe du laboratoire LEHNA (ENTPE, CNRS, Université Lyon 1, Inra) s'intéresse ainsi à des sujets tels que la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ou la gestion optimisée des effluents hospitaliers.

Pour clore ce tour d'horizon non exhaustif, on notera enfin que la chimie verte et les polymères biosourcés sont l'objet de travaux à l'École supérieure de chimie physique électronique de Lyon, l'ENTPE, l'INSA de Lyon et l'Université Jean Monnet Saint-Étienne. ●

** Technologies de l'information et de la communication*

Pilote industriel de traitement thermique (désorption, pyrolyse, combustion).
©PROVADEMSE 2012

Gestion durable des déchets

La plate-forme PROVADEMSE, labellisée par le pôle de compétitivité Axelera, est un centre de compétences au service des éco-entreprises dans les domaines des Ecotech/Cleantech, et plus particulièrement de la gestion durable des déchets, ressources en eau, matières premières et énergie dans les milieux industriels et urbains. Cette plate-forme constitue un outil de transfert vers le monde économique des activités de recherche de l'INSA de Lyon, l'École des Mines de Saint-Étienne, les Universités Lyon 1 et Joseph Fourier-Grenoble, l'INP de Grenoble, l'ENTPE et le CNRS auxquels s'ajoutent le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) et le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment).

Contact : http://www.provademse.com
Jacques Méhu, contact@provademse.com

JEAN-YVES TOUSSAINT, REGARDS PLURIELS SUR LA VILLE

Difficile de classer Jean-Yves Toussaint. Architecte DPLG de formation, il est titulaire d'un doctorat ès lettres et sciences humaines (en sociologie), professeur des universités à l'INSA de Lyon (en aménagement de l'espace et urbanisme), habilité à diriger des recherches en sociologie et en démographie. Plus précisément, dit-il, *« mes travaux de recherche traitent de la ville en partant des objets fabriqués qui la constituent »*. Cette multidisciplinarité n'est certainement pas étrangère à l'originalité des recherches qu'il mène, à la fois comme directeur de l'unité mixte de recherche du CNRS « Environnement, Ville et Société » (EVS) et comme responsable du Laboratoire d'excellence (LabEx) « Intelligences des Mondes Urbains » (IMU). Deux entités scientifiques qui jouent un rôle majeur dans les recherches sur la ville menée dans la métropole Lyon Saint-Étienne.

Le laboratoire EVS est une « grosse » UMR : 95 membres, permanents et contractuels et pas moins de 112 doctorants. Cette unité de recherche rassemble des chercheurs issus des Universités Lyon 3, Lyon 2, Jean Monnet Saint-Étienne, de l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE), de l'ENS de Lyon, de l'INSA de Lyon ainsi que de l'École des Mines de Saint-Étienne. Son approche est originale : elle s'intéresse aux questions à l'interface de la ville et de son environnement. EVS est ainsi organisé autour de trois grandes préoccupations. Tout d'abord les grands hydrosystèmes fluviaux et la façon dont l'activité urbaine les affecte ; les manières dont les acteurs de l'environnement urbain l'organisent, le régulent, le gouvernent ; les interactions qu'objets et dispositifs techniques peuvent établir, entretenir avec ces mêmes environnements urbains.

Jean-Yves Toussaint s'occupe de deux entités scientifiques qui jouent un rôle majeur dans les recherches sur la ville menées dans la métropole Lyon Saint-Étienne.
© INSA LYON

EVS est aussi l'un des très nombreux laboratoires de Lyon et de Saint-Étienne – une bonne vingtaine en sciences humaines et sciences dures – constituant le LabEx « IMU ». Jean-Yves Toussaint en est à l'origine avec trois autres chercheurs : Christelle Morel Journel, de l'Université Jean Monnet Saint-Étienne (EVS), Gilles Pinson de l'Institut d'études politiques de Lyon (Triangle) et Atilla Baskurt de l'INSA de Lyon (LIRIS). Tous les quatre constituent le comité de pilotage de ce vaste dispositif de recherche et d'expérimentation centré sur la ville, l'urbain, la métropolisation et l'urbanisation. Un dispositif unique sur le plan international de par l'étendue de ses recherches.

Ouvert aux acteurs de terrain

Surtout, IMU joue de façon extrêmement volontariste la carte de la pluralité scientifique. *« Elle permet de changer la façon de poser les problèmes »*, affirme Jean-Yves Toussaint. La diversité des laboratoires qui constituent le LabEx en témoigne, tout comme son comité de pilotage : Christelle Morel Journel est géographe, Gilles Pinson spécialiste des sciences politiques et Atilla Baskurt spécialiste des sciences et techniques de l'information et de la communication. Mieux, Jean-Yves Toussaint souligne la volonté d'IMU d'aller encore plus loin en termes de pluralité, c'est-à-dire de ne pas se limiter aux producteurs de connaissances mais de faire participer aux recherches des praticiens, des acteurs de terrain venus du monde de l'entreprise et de celui des collectivités territoriales. C'est déjà le cas avec l'un des premiers sujets de recherche soutenu par IMU qui porte sur l'étude de la filière de recyclage des déchets de construction (projet GRAVATS).

EVS, IMU… Ce n'est certainement pas un hasard si les deux structures se déploient dans l'agglomération Lyon Saint-Étienne. *« C'est une métropole parfaitement représentative des* "second cities", *ces villes entre 2 et 10 millions d'habitants par lesquelles passe le phénomène d'urbanisation contemporain »*, souligne Jean-Yves Toussaint. Elle constitue ainsi un champ d'observation et d'expérimentation privilégié.

IDEEL L'USINE DU FUTUR SERA PROPRE

C'est l'un des tout premiers Instituts d'excellence sur les énergies décarbonées (IEED) à avoir été retenus dans le cadre des Investissements d'avenir. Son nom : IDEEL. Sa mission : préparer l'usine du futur, c'est-à-dire une usine qui aura réduit ses consommations d'énergie. Une usine qui verra ses émissions de CO_2, le volume de ses déchets et ses pertes énergétiques et thermiques diminuer très significativement. Une usine, enfin, capable de valoriser ou recycler ses émissions de CO_2 et de développer de nouveaux produits à faible impact environnemental.
IDEEL a été porté sur les fonds baptismaux par une multitude de partenaires. Des industriels : Arkema, GDF Suez, PEP, Rhodia, SITA. Des pôles de compétitivité : Axelera, Tenerrdis, Plastipolis, Trimatec, LUTB et Viaméca. Et des laboratoires de recherche : IFP Énergies nouvelles, le CNRS, l'INSA de Lyon et l'École des Mines de Saint-Étienne
L'ambition de cet institut implanté au cœur de la « Vallée de la chimie » est immense. Il vise à créer un campus technologique destiné à attirer de nouveaux centres de R & D. En dix ans, il devrait accueillir 250 chercheurs supplémentaires sur le campus qui regroupe actuellement 1 600 chercheurs. Dans un premier temps, IDEEL se concentre sur des programmes de recherche en bioénergie, procédés bas carbone et recyclage, et le développement d'outils de simulation numérique, d'analyse industrielle et d'évaluation environnementale. Soit quelque 30 M€ d'investissements sur six ans pour donner naissance à des plates-formes technologiques et des pilotes préindustriels.

30 M€
vont être investis sur six ans pour créer des plates-formes technologiques et des pilotes préindustriels.

IMP UNE GRANDE PREMIÈRE DANS LE RECYCLAGE DES PLASTIQUES

Des recherches fondamentales à vocation applicative. C'est ainsi que le laboratoire Ingénierie des matériaux polymères (IMP) définit son activité. Avec des compétences s'étendant de la chimie macromoléculaire aux matériaux polymères et aux interfaces des sciences de la vie, il développe des axes de recherche allant de la synthèse de nouvelles architectures macromoléculaires à la formulation des matériaux polymères en passant par le contrôle des procédés de mise en œuvre. Il ne compte pas moins de 80 permanents et 120 doctorants et post-doctorants.
Il n'y a donc aucun doute à avoir sur l'aspect fondamental des recherches menées dans cette UMR commune au CNRS, l'Université Lyon 1, l'INSA de Lyon et l'Université Jean Monnet Saint-Étienne.

Les recherches au laboratoire Ingénierie des matériaux polymères trouvent de nombreux débouchés, notamment dans l'industrie automobile.
© C. FORTUNIER

Quant à la vocation applicative, elle s'est brillamment illustrée il y a peu par une première mondiale réalisée dans l'industrie automobile : les pare-chocs de la récente 208 de Peugeot utilisent en effet un mélange de haute qualité de polymères recyclés. D'une qualité telle qu'il est possible de les peindre, caractéristique cruciale pour l'automobile. La formulation et les procédés de production de cette matière résultent du travail mené entre l'équipementier Plastic Omnium, qui produit les pare-chocs et le laboratoire IMP. Ils ont d'ailleurs donné lieu à des brevets communs. Cette très forte compétence en matière de recyclage des polymères – elle représente environ 15 % de l'activité du laboratoire – se retrouve dans d'autres travaux, menés avec le fabricant de films Toray Films Europe. Il s'agit cette fois de la mise au point de la recyclabilité de films bi-couches à base de PET (polyéthylène téréphtalate). Recyclables, donc susceptibles d'être réutilisés. Là aussi, c'est une première. Et là également, il est question de brevet…

Comité éditorial :
Rédaction :
Conception graphique et réalisation :

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

Et recevez en cadeau l'agenda 2013 Exacompta

Sobre et élégant, cet agenda de poche réalisé spécialement pour vous, vous accompagnera au quotidien.
Un format pratique, avec une semaine sur 2 pages afin de visualiser votre planning d'un seul coup d'œil.

- Semaine sur 2 pages • Répertoire et Atlas en couleur amovible • Un stylo noir et or
- Couverture synthétique façon winner piqûre sellier ton sur ton • Couleur : noir
- Format 8,5 x 16 cm reliure spiralée.

Choisissez le 4 x sans frais

15€50

Simple !
Pratique !
Sans contraintes !

1 an : 62€ au lieu de ~~90,90€~~

soit plus de 30% de réduction !

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 17, route des Boulangers - 78926 Yvelines cedex 9

FLRC471

OUI, je souhaite m'abonner à La Recherche et recevoir en cadeau l'agenda 2013 Exacompta et son stylo signé La Recherche.

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS** (dont 2 numéros spéciaux) au prix de **62€** au lieu de ~~90,90€~~.

Je suis étudiant* ou enseignant* : je ne paie que 56€.

☐ **Je profite du paiement en 4 fois sans frais et je règle dès maintenant 15€50** par chèque ou CB, le quart du montant de mon abonnement.

Puis je recevrai par courrier l'autorisation de prélèvement qui me permettra de régler les trois autres versements par prélèvement automatique trimestriel.

Je suis étudiant* ou enseignant* : je ne paie que 14€.

J'indique ci-dessous mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : _____

Ville : _____

Téléphone : _____

Si vous souhaitez recevoir des offres de notre part, merci de nous indiquer votre e-mail :

_____ @ _____

Je règle à l'ordre de La Recherche par :

☐ Par chèque ☐ Par carte bancaire

Numéro CB : _____

Notez aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de votre carte bancaire, au niveau de la signature : _____

Expire fin : _____

Signature obligatoire

La Recherche

Sophia Publications - SA au capital de 115 500 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31/03/2013 dans la limite des stocks disponibles. * Pour bénéficier de ce tarif préférentiel, merci de nous envoyer un justificatif de votre statut. Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez cette case ☐.

7 Vers des lentilles à

Les rayons gamma sont tellement énergétiques qu'ils ne devraient pas être déviés par la matière : une idée reçue qui vient de tomber.

PAR **Viviane Thivent,** journaliste.

A l'institut Laue-Langevin, à Grenoble, une expérience d'optique n'a pas donné le résultat escompté. Alors que ses collaborateurs s'échinent à identifier la source de l'erreur, Dietrich Habs, de l'université Ludwig-Maximilians de Munich, parcourt à nouveau les données et s'exclame : *« Oups ! ça, c'est une découverte. »*

En effet, si les mesures qu'il a sous les yeux sont exactes, les rayons gamma, ondes électromagnétiques dont la fréquence dépasse 10^{19} hertz, seraient déviés par la matière dans des proportions inattendues. Après vérification, c'est ce qu'annonce l'équipe en mai 2012 [1].

Nous avons tous observé qu'un bâton à moitié plongé dans l'eau semble brisé. Cette illusion s'explique par le phénomène de réfraction, qui tire son origine du changement de vitesse de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre. Ce changement de vitesse influence sa trajectoire.

Si on considère une onde qui arrive de biais sur l'interface entre deux milieux, alors tout le front d'ondes ne touche pas l'interface en même temps. Cette arrivée échelonnée engendre un changement de la direction de propagation dont l'ampleur, pour un même matériau, varie en fonction de l'angle d'incidence. La capacité d'un matériau placé dans le vide à dévier la lumière est mesurée par l'indice de réfraction. Plus celui-ci est supérieur à 1, plus la lumière est déviée.

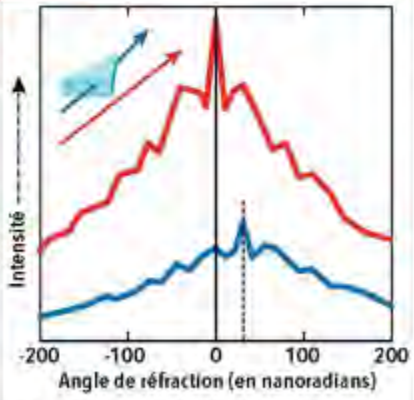
Fréquence de la lumière. On peut expliquer ces variations de vitesse de lumière par le comportement des photons qui la constituent. Lorsqu'ils se propagent dans un milieu matériel, ils interagissent avec les électrons des atomes. Ceux-ci sont excités, et ils repercent l'énergie acquise en émettant un photon de même énergie. Le faisceau de lumière progresse ainsi, de proche en proche dans le milieu, à une vitesse qui correspond à l'intensité des interactions, donc à la structure du milieu.

Ce point de vue microscopique permet aussi d'expliquer que l'indice de réfraction dépende de la fréquence de la lumière : plus elle est élevée, plus la probabilité d'interaction avec les électrons est faible. *« Un électron se comporte comme une balle bloquée entre deux ressorts,* explique Michael Jentschel, de l'institut Laue-Langevin et collaborateur de Dietrich Habs. *Si on imprime à la balle une oscillation lente, elle suit le mouvement. Mais si l'oscillation est trop rapide, elle n'y parvient plus. »* De même, au-delà d'une certaine fréquence, les photons ne peuvent plus interagir avec les électrons, et ils ne sont plus déviés par la matière. Ainsi, pour les fréquences supérieures à 10^{17} hertz, correspondant aux rayons X, le phénomène de réfraction change de sens et devient si faible qu'il ne permet plus de focaliser la lumière.

C'est du moins ce que l'on croyait jusqu'en 1996. Cette année-là, une équipe du synchrotron européen installé à Grenoble, l'ESRF, parvient à dévier un faisceau de rayons X par réfraction. Leur idée de départ est simple : puisque la réfraction des rayons X est très faible, pourquoi ne pas l'amplifier en mettant bout à bout des dizaines de lentilles ? Anatoly Snigirev et ses collaborateurs de l'ESRF percent alors une vingtaine de petits trous alignés dans un bloc d'aluminium [2]. Les espaces laissés entre les trous forment autant de petites lentilles concaves, les seules capables de focaliser les rayons X puisque leur indice de réfraction est très légèrement inférieur à 1.

Grâce à ce dispositif, les physiciens prouvent la faisabilité des lentilles à rayons X. On en utilise aujourd'hui couramment en physique et en astronomie. *« L'expérience était simple,* commente Jürgen Härtwig, responsable du groupe

Fig.1 Indice de réfraction



UN RAYONNEMENT GAMMA qui traverse un prisme en silicium (en bleu) est très légèrement dévié par rapport à un faisceau initialement parallèle qui ne circule que dans l'air (en rouge).

© INSTITUT LAUE-LANGEVIN

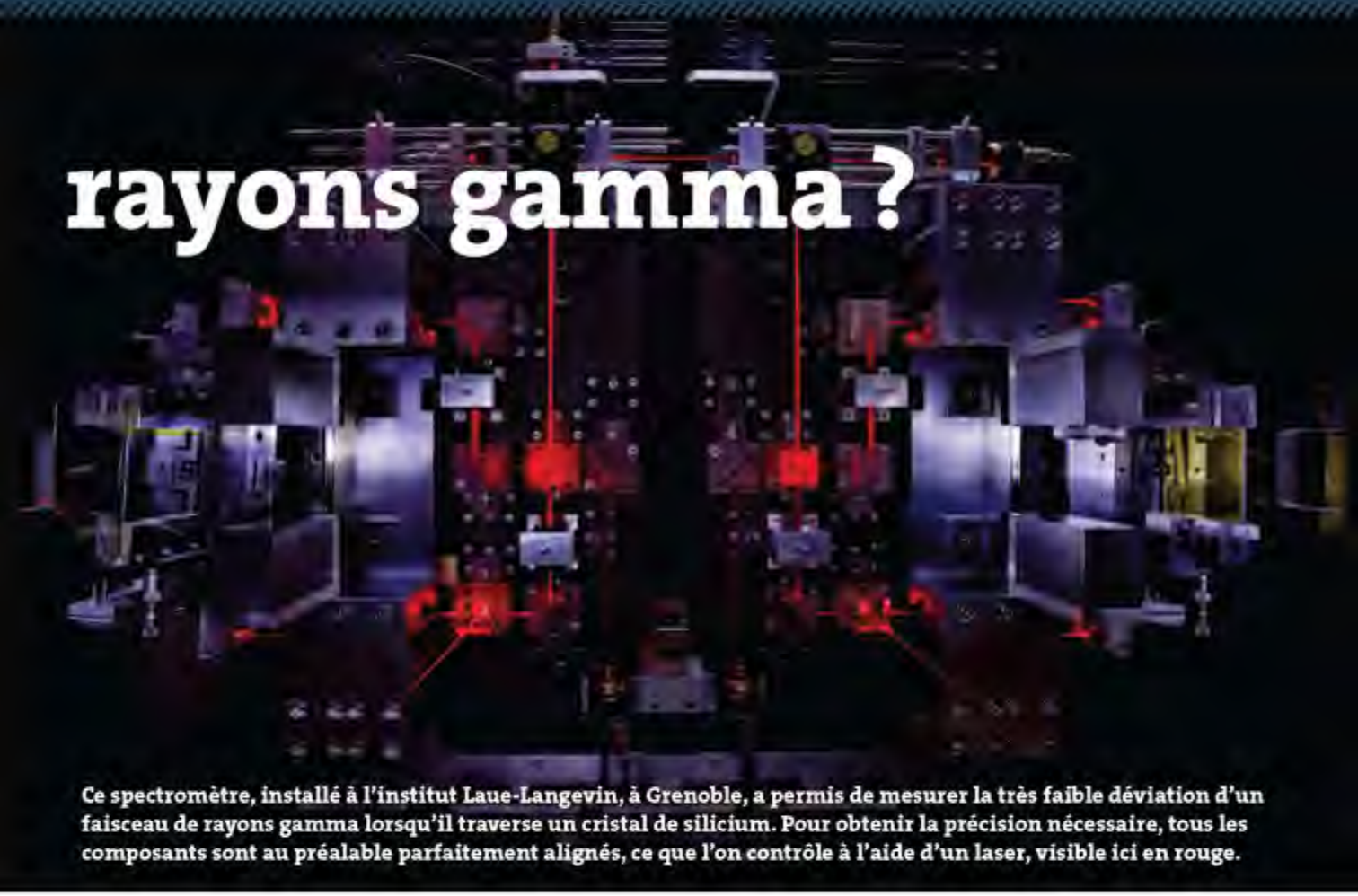
L'essentiel

> **LA DÉVIATION** d'une onde électromagnétique au passage entre le vide et un milieu matériel est inversement proportionnelle à sa fréquence.

> **LES RAYONS GAMMA,** qui ont les fréquences les plus élevées, ne devraient donc pas être déviés.

> **UNE ÉQUIPE ALLEMANDE** vient pourtant d'observer une telle déviation à l'aide d'un prisme de silicium.

rayons gamma ?



Ce spectromètre, installé à l'institut Laue-Langevin, à Grenoble, a permis de mesurer la très faible déviation d'un faisceau de rayons gamma lorsqu'il traverse un cristal de silicium. Pour obtenir la précision nécessaire, tous les composants sont au préalable parfaitement alignés, ce que l'on contrôle à l'aide d'un laser, visible ici en rouge.

d'optique en rayons X de l'ESRF, *mais elle nécessitait le faisceau de rayons X très fin d'un synchrotron.*»

Reste que, pour les chercheurs, ce qui se révélait possible avec les rayons X ne pouvait l'être avec des ondes de fréquence encore plus élevée, comme les rayons gamma. «*C'est l'une des premières choses que les physiciens apprennent dans leurs études : l'indice de réfraction est inversement proportionnel au carré de la fréquence du photon*, rappelle Jürgen Härtwig. *En d'autres termes, un effet à peine détectable pour les rayons X sera quasi nul pour des rayons plus énergétiques comme les gamma.*»

Source de gamma. Il a fallu que l'Europe se pique de construire, pour 300 millions d'euros, un grand instrument de recherche en Roumanie pour aller plus loin. Avec l'infrastructure ELI-NP, les scientifiques auront dès 2016 une source ajustable de rayons gamma très puissants. «*C'est en imaginant des expériences pour ELI-NP que nous avons eu l'idée de tester la réfraction des rayons gamma*», poursuit Michael Jentschel.

L'institut Laue-Langevin dispose en effet d'un réacteur à neutrons capable de produire, un peu malgré lui, des rayons gamma. Ceux-ci résultent de la désintégration de noyaux instables formés lors de collisions nucléaires. «*Nous avons canalisé ces rayonnements pour en faire un faisceau utilisable de rayons gamma de 0,18 à 2 mégaélectronvolts*», explique Michael Jentschel. Soit des fréquences comprises entre $4{,}3 \times 10^{19}$ et $4{,}8 \times 10^{20}$ hertz (les physiciens qui travaillent avec les rayons gamma préfèrent parler en énergie, grandeur proportionnelle à la fréquence). Puis ils ont placé un prisme de silicium sur le trajet de la moitié du faisceau.

Et, surprise : au-delà de 0,7 mégaélectronvolt ($1{,}7 \times 10^{20}$ hertz), le faisceau est légèrement dévié par le prisme ; l'effet, ténu, se révèle néanmoins 10 fois plus important que ce qui est prévu [fig.1]. En outre, avec 1,000 000 001, l'indice de réfraction redevient supérieur à 1, contrairement à ce que l'on observe avec les rayons X. Les photons interagissent donc avec la matière mais de quelle façon ?

«*Il est possible que les rayons gamma s'approchent si près du noyau qu'ils sont influencés par son champ électrique*», indique Michael Jentschel. Cet effet a été prédit en 1933 par le théoricien allemand Max Delbrück [3]. S'il est bien à l'origine de la déviation constatée, il pourrait être accentué. En effet, d'après la théorie de Delbrück, plus les noyaux des atomes sont gros, plus ils sont susceptibles de perturber, et donc de dévier les rayons gamma. C'est pourquoi les chercheurs testent d'ores et déjà des prismes avec un élément plus lourd : le germanium.

Cette découverte fait espérer de nouveaux types de lentilles, avec des applications en médecine et en astronomie. «*À condition que ce résultat, obtenu avec des rayons gamma d'assez faible énergie, soit aussi vérifié à des énergies plus élevées*», nuance Jürgen Härtwig. La question pourra être abordée expérimentalement dès 2013 avec la mise en route aux États-Unis du faisceau de gamma très brillant de MEGa-Ray puis, en 2016, en Europe, avec ELI-NP. ■

[1] D. Habs *et al.*, *PRL, 108*, 184802, 2012.
[2] A. Snigirev *et al.*, *Nature, 384*, 49, 1996.
[3] M. Delbrück, *Z. Phys., 84*, 144, 1933.

8 Première étape vers la guérison du sida

PAR Jean-Philippe Braly, journaliste.

Un médicament révèle au système immunitaire les cellules les plus réfractaires au traitement du sida : celles dans lesquelles se cache le virus. Première étape vers la guérison de cette maladie, la découverte suscite autant d'espoir que celle de l'AZT dans les années 1980.

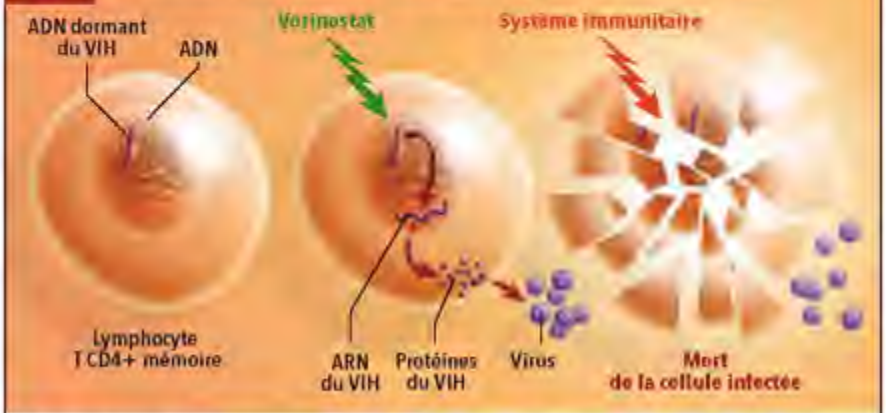
Pourra-t-on un jour guérir les personnes infectées par le virus du sida (VIH) ? Une étape majeure en ce sens a été franchie cette année par une équipe pilotée par David Margolis, de l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis [1]. Et le médicament qu'elle a testé sur huit séropositifs n'a rien à voir avec les traitements actuels, les antirétroviraux. En bloquant la multiplication du VIH, ces derniers réduisent sa concentration dans l'organisme des séropositifs… jusqu'à le rendre indétectable. Mais ils ne l'éradiquent pas complètement, et ne guérissent donc pas les malades. Et pour cause : dès le début de l'infection, des exemplaires du virus se cachent dans certains globules blancs à longue vie, échappant à l'action des antirétroviraux.

Comme dans les autres cellules qu'il infecte, le VIH transforme alors son matériel génétique (de l'ARN) sous forme d'ADN lisible par les cellules ; puis il intègre cet ADN dans leur noyau. Mais dans ces globules blancs à longue vie, cet ADN viral reste « silencieux » : la cellule ne le décrypte pas pour produire de nouveaux virus. Ces globules blancs deviennent ce que l'on appelle des « réservoirs » du VIH. Ils sont invisibles au système immunitaire qui ne peut repérer et attaquer que les cellules fabriquant le virus. *« Mais à tout moment, ces réservoirs peuvent enclencher le cycle de multiplication du VIH, et ainsi faire réémerger l'infection, ce qui nécessite de prendre les antirétroviraux à vie »*, explique Christine Rouzioux, spécialiste des réservoirs du VIH à l'hôpital parisien Necker.

Détruire les réservoirs. D'où l'idée de détruire ces réservoirs une bonne fois pour toutes. Or que montre l'étude pilotée par David Margolis ? Qu'un médicament parvient à forcer l'ADN silencieux du VIH à être transformé en ARN dans ces globules blancs réservoirs. En théorie, ceux-ci devraient entamer leur production de virus et se faire repérer par le système immunitaire, qui pourra alors les détruire [fig.1]. En ligne de mire : une éradication totale du VIH de l'organisme, gage d'une guérison. *« À bien des égards, l'importance de ce résultat est comparable à la découverte du potentiel de l'AZT au milieu des années 1980 – un des tout premiers antirétroviraux »*, souligne Steven Deeks, spécialiste du sida à l'université de Californie.

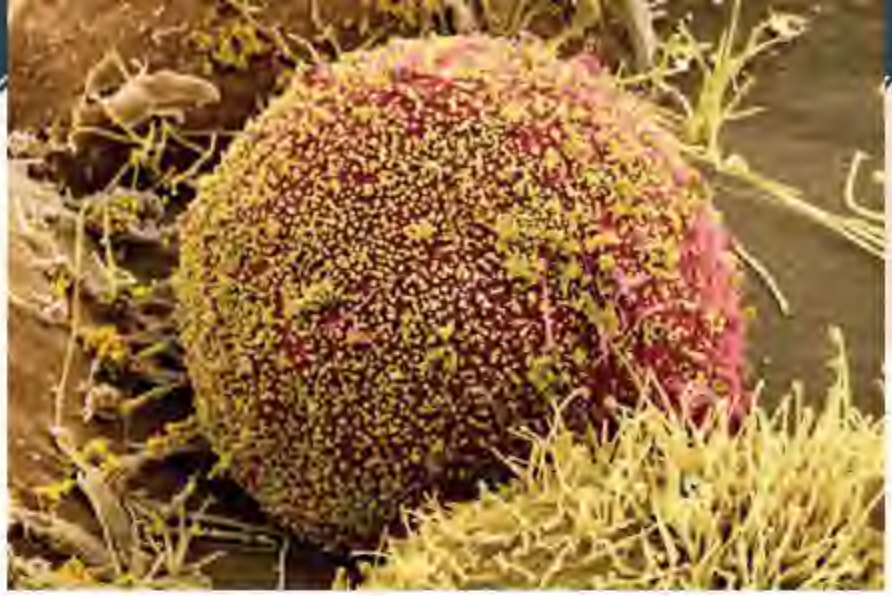
Cet essai américain a consisté à tester l'efficacité du Vorinostat, un anticancéreux utilisé pour traiter des cancers du système lymphatique. Si les chercheurs l'ont choisi, c'est parce qu'il inhibe certaines enzymes utilisées par le virus du sida pour rester enfoui à l'état dormant dans le génome de ces globules blancs réservoirs, les lymphocytes T CD4+

Fig.1 Effets du Vorinostat sur un globule blanc



LE VIRUS DU SIDA intègre son ADN dans le génome d'un globule blanc à longue vie - un lymphocyte T CD4+ mémoire - et y reste ainsi à l'état dormant (à gauche). Le Vorinostat force cet ADN viral à se transformer en ARN, qui permettra ensuite la fabrication de protéines du VIH. Le lymphocyte T CD4+ mémoire infecté devient ainsi visible pour le système immunitaire (au milieu). Celui-ci pourra alors le repérer et le détruire (à droite).

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSERT



Le lymphocyte T CD4+ mémoire (en rouge) est une des cibles du virus du sida (en jaune). Après l'avoir infecté, ce dernier lui fait produire de nouveaux virus. © THOMAS DEERINCK/NCMIR/SPL/COSMOS

mémoire. *In vitro*, ce type d'inhibiteurs enzymatiques avait déclenché la production du virus dans ces lymphocytes réservoirs [2]. Restait à tester cette stratégie sur des malades.

Compte tenu de la toxicité du Vorinostat (lire « Le poids des effets secondaires », ci-dessous), David Margolis et ses collègues n'en ont administré qu'une dose de 400 milligrammes à huit séropositifs sous antirétroviraux. Quelques heures plus tard, les chercheurs ont prélevé des lymphocytes T CD4+ mémoire dans leur sang. « *En moyenne, le Vorinostat a presque quintuplé la transcription de l'ADN des VIH dormants en ARN, étape intermédiaire avant la synthèse des protéines constitutives du virus*, indique David Margolis. *Chez certains volontaires, ce taux a été multiplié par dix.* »

Trois à quatre mois plus tard, l'équipe a de nouveau prélevé des lymphocytes T CD4+ mémoire sur deux des huit volontaires. Leur taux d'ARN viral avait chuté pour retrouver leurs niveaux antérieurs à l'administration de Vorinostat. « *Notre étude est la première à prouver qu'il est possible de débusquer les VIH dormants de leurs réservoirs chez l'homme*, conclut David Margolis. *C'est un premier pas décisif vers un traitement curatif capable d'éradiquer le virus de l'organisme.* »

En deux temps. À l'annonce de ces résultats, de nombreux spécialistes ont affiché leur optimisme. Il faut cependant rester prudent car l'essai ne concerne qu'un petit nombre de malades. Par ailleurs, chez les huit patients enrôlés, les chercheurs n'ont pas détecté d'augmentation de particules virales dans le sang. « *Les lymphocytes T CD4+ mémoire étant très rares, il n'est pas dit qu'une hausse d'ARN viral en leur sein entraîne une hausse de virus détectable* », se défend David Margolis. « *On ne sait pas non plus si les réservoirs du VIH ont ensuite été détruits par le système immunitaire* », note Sharon Lewin, spécialiste des maladies infectieuses à l'université Monash de Melbourne, en Australie.

Sur ce point, des travaux *in vitro* pilotés par Robert Siliciano, de l'université Johns Hopkins de Baltimore, suggèrent que le Vorinostat ne suffirait pas. « *Nous avons découvert que, pour détruire les réservoirs à VIH traités au Vorinostat, des globules blancs dits "tueurs" doivent d'abord être stimulés par des molécules spécifiques du VIH, ses antigènes* », explique-t-il. [3] « *Ainsi, nous aurons peut-être besoin d'une approche en deux temps : un premier médicament comme le Vorinostat qui active la production du VIH par les réservoirs, et un second qui incite le système immunitaire à les détruire* », prévoit Adam Spivak, spécialiste des maladies infectieuses à l'université d'Utah, aux États-Unis.

Autre piste : combiner le Vorinostat avec d'autres médicaments également capables d'activer la transcription des VIH dormants. C'est ce que suggère une étude franco-belge pilotée par Carine Van Lint, de l'université libre de Bruxelles : « In vitro, *nous avons découvert que la réactivation du VIH est plus importante lorsque le Vorinostat est associé à d'autres inhibiteurs enzymatiques qui réactivent aussi l'expression des gènes du virus* », expose-t-elle [4].

Cette aventure n'en est donc qu'à ses débuts, mais c'est clairement une nouvelle ère qui s'ouvre. Pour l'heure, David Margolis cherche à recruter un plus grand nombre de séropositifs pour tester le Vorinostat à différentes doses, en une ou plusieurs prises. Objectif : déterminer le schéma le plus efficace. ■

[1] N. M. Archin et al., *Nature*, 487, 482, 2012.
[2] N. M. Archin et al., *AIDS Res. Hum. Retroviruses*, 25, 207, 2009.
[3] L. Shan et al., *Immunity*, 36, 491, 2012.
[4] S. Bouchat et al., *AIDS*, 26, 1473, 2012.

L'essentiel

> **UN ANTICANCÉREUX** a permis de réactiver les gènes du virus du sida à l'état silencieux dans le noyau de certains globules blancs.

> **CETTE PREMIÈRE ÉTAPE** laisse espérer la possibilité d'éradiquer le virus de l'organisme.

> **D'AUTRES COMBINAISONS** médicamenteuses potentiellement plus efficaces sont à l'étude.

Le poids des effets secondaires

Recourir au Vorinostat présente plusieurs avantages : ses effets sur l'homme sont bien documentés, et sa formulation pharmaceutique est déjà disponible. En revanche, comme la plupart des anticancéreux autorisés, le Vorinostat présente une certaine toxicité à l'origine de cas d'anorexie, de spasmes musculaires, de chute du taux de plaquettes sanguines... « *Ce rapport bénéfice/risque est acceptable pour des patients cancéreux, mais nettement moins pour des séropositifs qui vont bien grâce aux antirétroviraux* », indique Christine Rouzioux. Toutefois, à long terme, les antirétroviraux peuvent aussi générer des effets indésirables : maladies cardio-vasculaires, atteintes du pancréas et du foie, neuropathies... Si le Vorinostat est un jour autorisé en routine pour les séropositifs, il faudra donc peser le pour et le contre, au cas par cas.

9 L'expansion de l'Univers est bien accélérée

PAR Antoine Cappelle, journaliste.

En mesurant les distances entre les amas de galaxies et les nuages d'hydrogène à différentes époques dans l'Univers, on reconstitue les variations de sa vitesse d'expansion.

Qu'est-ce qui détermine la répartition de la matière dans l'Univers ? La gravité, bien entendu : les étoiles sont regroupées en galaxies, elles-mêmes regroupées en amas. Mais peut-on être plus précis ? D'après les modèles cosmologiques, la disposition des amas de galaxies serait héritée de l'Univers primordial. Et c'est ce qu'ont confirmé en 2012 les premiers résultats du projet BOSS, qui rassemble depuis trois ans une soixantaine de chercheurs à travers le monde. On retrouve effectivement dans l'Univers observable les variations de la densité de matière qui existaient dans l'Univers quand il n'avait que 380 000 ans.

L'essentiel

- LA MATIÈRE dans l'Univers n'est pas répartie de façon totalement homogène.
- LES POSITIONS RELATIVES des zones les plus denses résultent de la propagation de fluctuations quantiques dans les premières phases de l'Univers.
- CETTE STRUCTURE a été quantifiée précisément pour la première fois, confirmant les variations de l'expansion de l'Univers.

Depuis douze ans, un télescope du Nouveau-Mexique scrute la partie de l'univers extragalactique non masquée par la Voie lactée observable à partir de cette région du monde. Après des observations photométriques, ce télescope enregistre dès 2009 les spectres de galaxies et de quasars*, c'est-à-dire les fréquences dont est composée la lumière qu'ils émettent. « *Nous avons pour le moment mesuré et analysé les spectres de près de 300 000 galaxies et 80 000 quasars, qui nous ont permis d'obtenir nos premiers résultats* », précise Nathalie Palanque-Delabrouille, membre du projet BOSS et physicienne au CEA.

Pour cartographier la répartition de la matière dans l'Univers, les astrophysiciens se sont concentrés sur des galaxies bien particulières, anciennes et très lumineuses, qui se trouvent au cœur des amas de galaxies. Elles ont été préalablement sélectionnées grâce aux observations photométriques. « *Ces objets sont de bons marqueurs de la densité de matière*, explique la physicienne. *Cela a été établi d'après des observations de l'Univers proche et les modèles d'évolution des galaxies et des amas.* »

La distance de ces galaxies est calculable à partir de leurs spectres. On y distingue en effet des fréquences caractéristiques des éléments chimiques qui les composent, dont l'hydrogène et l'oxygène. À cause de l'expansion de l'Univers, ces fréquences sont décalées vers des valeurs d'autant plus grandes que l'émetteur est éloigné (de la même façon que la sirène d'une ambulance est d'autant plus aiguë qu'elle s'éloigne vite).

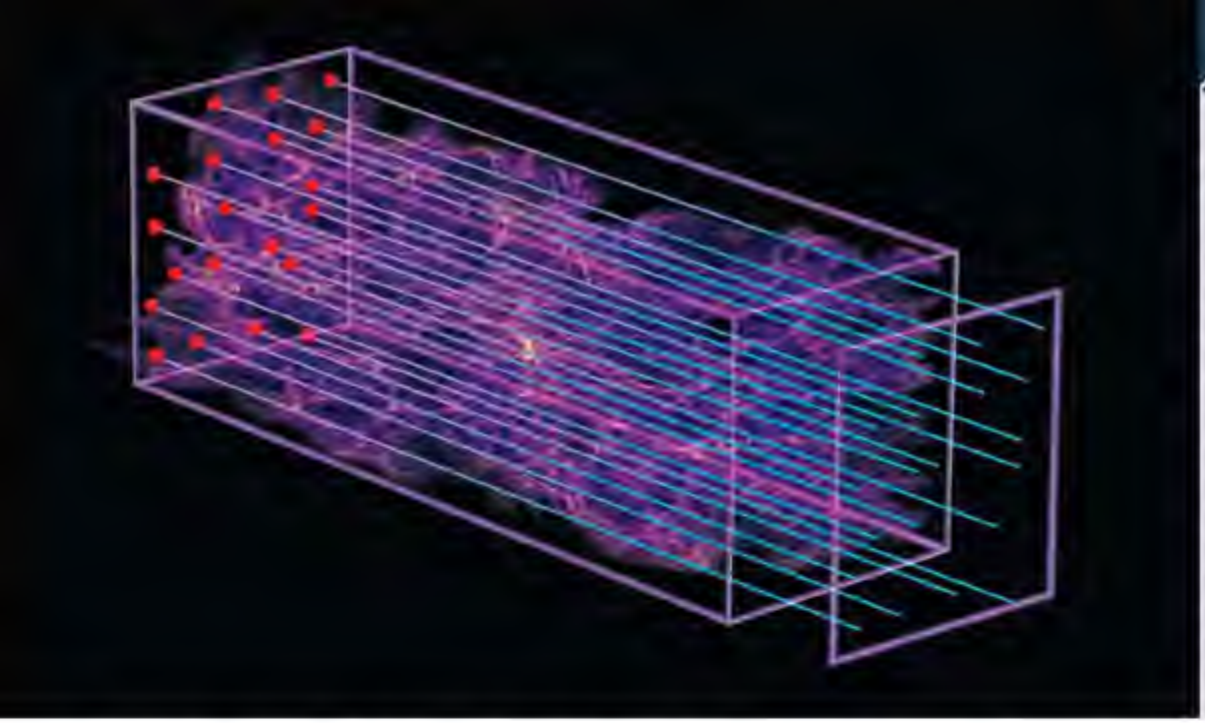
Les distances ainsi mesurées, jusqu'à 6,4 milliards d'années-lumière, complètent les coordonnées en deux dimensions visibles depuis la Terre. L'équipe du projet BOSS a ainsi réalisé une cartographie en trois dimensions, sur un volume de 2,2 gigaparsecs* cubes. « *Une telle étude avait déjà été réalisée, mais sur un volume deux fois plus petit et avec une densité de galaxies cinq fois moins importante* », précise Nathalie Palanque-Delabrouille.

Ondes de matière. Les physiciens ont ensuite calculé les distances séparant chaque galaxie de toutes les autres, en les transposant dans un référentiel indépendant de l'expansion de l'Univers. Cette transposition fait intervenir un modèle cosmologique que les résultats de l'étude permettront d'affiner. Parmi les données ainsi obtenues, une distance apparaît plus fréquemment que les autres : 150 mégaparsecs (1).

Ce chiffre, prévu par la théorie, est l'empreinte d'ondes acoustiques qui se sont propagées dans l'Univers primordial. Juste après le Big Bang, l'Univers était un plasma très chaud et dense, dans lequel se trouvaient des zones de densité plus élevée, créées par des fluctuations quantiques. Des oscillations se propageaient dans le plasma à partir de ces zones plus denses, de la même façon

* **LES QUASARS** sont des astres très brillants.
* **UN PARSEC** est une distance d'environ 3,3 années-lumière.

© ILLUSTRATIONS PAR ZOSIA ROSTOMIAN, LBNL; NIC ROSS, BOSS LYMAN-ALPHA TEAM, LBNL



La lumière (traits bleus) de quasars lointains (points rouges) est absorbée par des nuages d'hydrogène (en violet), à des longueurs d'onde qui dépendent de la distance séparant ceux-ci de la Terre. Les astrophysiciens cartographient ainsi leur répartition.

que des vagues ondulent la surface de l'eau lorsque l'on y jette un caillou.

Mais 380 000 ans après le Big Bang, l'Univers, refroidi par son expansion, est brusquement sorti de l'état de plasma, ce qui a eu pour effet de figer les oscillations de la matière dans l'état où elles se trouvaient à ce moment. C'est-à-dire en formant autour des points de surdensité initiaux des anneaux d'un rayon de 150 mégaparsecs où la matière était plus dense. *« Cet excès de matière avait déjà été observé, mais avec une précision insuffisante pour affirmer une réelle découverte »*, rappelle Nathalie Palanque-Delabrouille.

Les chercheurs ont ensuite vérifié que cette répartition visible dans des zones à forte densité de matière se retrouve également dans des régions moins denses de l'Univers. La confirmation a été obtenue grâce aux quasars. *« En observant le spectre d'émission d'un quasar, on obtient en même temps le spectre d'absorption du milieu peu dense qui le sépare de nous*, explique la chercheuse. *Celui-ci est constitué de nuages de gaz d'hydrogène qui absorbent une partie de la lumière des quasars à des longueurs d'onde caractéristiques. »*

Expansion ancienne. Ainsi, en fonction du décalage et de l'intensité des longueurs d'onde absorbées, on reconstitue la répartition des nuages d'hydrogène entre les quasars et notre galaxie. En analysant cette répartition par une méthode analogue à celle appliquée aux galaxies, les chercheurs ont retrouvé l'empreinte des oscillations primordiales : la distance caractéristique de 150 mégaparsecs.

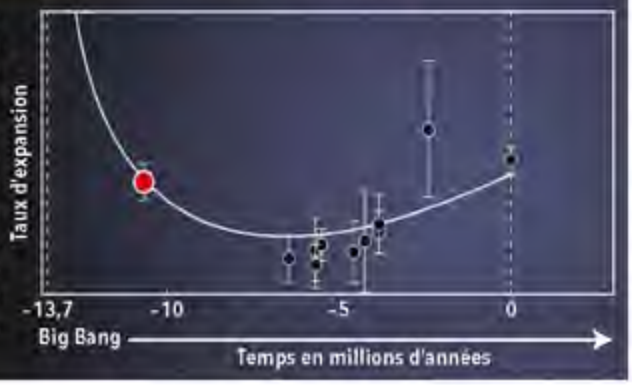
Cette étude sur les quasars présente un autre intérêt, car ceux-ci sont beaucoup plus éloignés que les galaxies étudiées : ils ont été observés jusqu'à 11 milliards d'années-lumière de la Terre. Or, plus un objet est lointain, plus la lumière qui nous arrive de celui-ci est ancienne. Entre quasars et galaxies, les données utilisées par BOSS caractérisent donc différentes époques.

« Nous avons mesuré la longueur de 150 mégaparsecs à différentes périodes de l'histoire de l'Univers, précise Nathalie Palanque-Delabrouille. *Nous la comparons aux prédictions obtenues dans le cadre de plusieurs modèles cosmologiques. La compatibilité entre la prédiction et la mesure nous indique si ces modèles sont viables ou pas. »* Les premiers résultats confirment ainsi que l'expansion de l'Univers s'accélère, et précisent la valeur du taux d'expansion. Ce paramètre, qui détermine la vitesse d'éloignement d'un objet selon sa distance, est actuellement de 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec [2].

Les données issues de l'analyse des spectres de quasars permettent d'aller plus loin, en remontant jusqu'à une époque où l'Univers était âgé de 2,7 milliards d'années. Les résultats de BOSS confirment que l'expansion de l'Univers était alors en décélération [fig. 1]. *« Nous espérons préciser le moment où a commencé l'accélération actuellement en cours. On estime que l'Univers avait alors un peu moins de 7 milliards d'années »*, ajoute l'astrophysicienne. Ces informations alimenteront également les réflexions sur l'énergie noire, qui serait le moteur de cette accélération, mais dont la nature demeure mystérieuse. ■

Fig.1 La vitesse d'expansion de l'Univers

LA NOUVELLE mesure de la vitesse d'expansion de l'Univers (en rouge) confirme la courbe théorique (en blanc). Après une décroissance initiale, cette vitesse a raugmenté il y a un peu moins de 7 milliards d'années. Les mesures précédentes sont représentées par les points noirs.



[1] L. Anderson *et al.*, arXiv : 1203.6594v1, 2012.
[2] N.G. Busca *et al.*, arXiv : 1211.2616v1, 2012.

10 Le plus ancien bateau du monde

Le plus ancien bateau du monde a près de 5 000 ans. Il vient d'être découvert en Égypte, préservé grâce aux pratiques funéraires des anciens Égyptiens.

PAR **Nicolas Constans,**
journaliste.

L'essentiel

> LES RESTES d'une barque construite vers 2950 av. J.-C. ont été découverts en Égypte.

> C'EST LE PLUS ANCIEN bateau connu constitué par l'assemblage de planches.

> ON IGNORE encore s'il a navigué ou s'il n'a eu qu'une fonction symbolique.

Les plus anciens bateaux connus sont des pirogues, creusées dans des troncs d'arbre il y a au moins 8 000 ans. Des embarcations faites de roseaux ou de papyrus ont probablement aussi existé, mais les dimensions de ces premiers bateaux étaient restreintes. Pour embarquer des cargaisons importantes et effectuer de longs trajets, les hommes ont dû construire des navires en assemblant des planches de bois. L'un des plus vieux à ce jour vient d'être découvert en Égypte : il est daté de 2950 av. J.-C.

Il a été construit sous le règne du roi Den, cinquième monarque de la Ier dynastie et premier à porter le titre de « roi de Haute- et Basse-Égypte ». Quelques siècles plus tard, ses successeurs, qui auront entre-temps pris le titre de pharaon, construiront des pyramides sur le plateau de Gizeh.

Planches « cousues ». La découverte a été faite à Abou Rawach, site funéraire situé près de la première capitale du royaume, Memphis, au sud du Caire. Le bateau, en acacia, mesurait sans doute une douzaine de mètres de long. Sans doute, car la moitié seulement, correspondant à la partie centrale de la coque, est conservée. Elle ressemble fortement aux barques fluviales connues en Égypte quelques siècles plus tard, notamment grâce à des dessins, des gravures et des modèles réduits. Comme l'immense majorité des bateaux plus tardifs de l'Antiquité, celui-ci est « cousu », c'est-à-dire que ses planches furent assemblées par un système de tenons et de mortaises, et maintenues serrées par des liens végétaux.

Cette découverte est en fait une redécouverte. En 1913 et 1914, Pierre Montet, jeune archéologue français, se voit confier la fouille d'un cimetière à Abou Rawach. Il met au jour des tombes en brique crue de la Ier dynastie. Au cours de ses travaux, il tombe sur ce qui lui semble être un mur en brique crue et un plancher en bois. Puis ayant terminé les fouilles des tombes, il quitte la zone. Et par la suite, il ne publiera ses découvertes qu'en partie.

Manquant d'informations sur ces fouilles anciennes, l'Institut français d'archéologie orientale du Caire décide en 2007 de les reprendre avec des techniques modernes. Il les confie à Yann Tristant, aujourd'hui maître de conférences à l'université Macquarie, en Australie. En juillet 2012, celui-ci, intrigué par cette mention d'un plancher dans les notes de Pierre Montet, fouille à nouveau la zone. À sa grande surprise, ce n'est pas un plancher qu'il découvre, mais une barque. Le mur était en fait celui qui bordait la fosse où les Égyptiens avaient déposé le bateau.

L'erreur de Pierre Montet était compréhensible : en 1914, le bateau égyptien le plus ancien était postérieur d'un millénaire aux tombes qu'il fouillait. La découverte de bateaux du IIIe millénaire avant notre ère n'a eu lieu que dans les années 1930 et 1940, à Saqqâra et à Hélouan, sites funéraires des environs de Memphis datant de la Ier dynastie. Mais nul ne sait ce que sont devenus les bateaux de ces deux sites. « *Dans le premier cas, nous ne disposons que d'un dessin et d'une photo, et, dans l'autre, nous ne sommes même pas sûrs qu'un bateau ait réellement été trouvé* », explique Yann Tristant.

Plus récemment, entre 1991 et 2000, une équipe américaine a aussi découvert quatorze bateaux côte à côte à Abydos. C'est dans ce site funéraire au centre du royaume que sont notamment enterrés tous les pharaons de la

© YANN TRISTANT/INSTITUT FRANÇAIS D'ARCHÉOLOGIE ORIENTALE

Ces planches, assemblées par un système de tenons et de mortaises, et maintenues serrées par des liens végétaux, formaient la coque d'une embarcation dont on ignore si elle a navigué. Ce navire fossilisé a été découvert dans un cimetière de la Ire dynastie égyptienne.

Ire dynastie. Leur datation est encore débattue. Elle découle en effet de celle d'un édifice funéraire royal – enclos de briques crues auquel les puits contenant des barques sont adossés.

Symbole du pouvoir. Les archéologues qui l'ont fouillé n'ont pu déterminer précisément à quel pharaon il appartenait. Comme les pharaons inhumés à Abydos ont régné pendant la Ire et la IIe dynastie, les bateaux peuvent avoir été déposés pendant ces deux époques, soit entre 3100 et 2700 ans av. J.-C. *« Mais il y a tout de même de fortes présomptions pour qu'ils datent de la Ire dynastie, comme le bateau d'Abou Rawach »*, indique Pierre Tallet, de l'université Paris-Sorbonne. La datation de ce dernier est en revanche plus sûre. Elle s'appuie à la fois sur une datation directe du bois, par la méthode du carbone-14, et sur la présence de céramiques caractéristiques de cette période.

Quant à la fonction du bateau d'Abou Rawach, elle est difficile à imaginer, faute de textes datant de cette époque. Les archéologues l'ont retrouvé dans une nécropole où étaient inhumés des notables. C'est donc sans doute l'entourage d'un de ces défunts qui a fait enfouir le bateau lors des funérailles. Une coutume qu'ils ont probablement empruntée à leur souverain.

Cette pratique est en effet attestée, postérieurement, pour les pharaons. Pour ces derniers, les bateaux ont une grande importance symbolique depuis une époque très ancienne. *« Dès les débuts de la civilisation égyptienne il y a 6 000 ans, les bateaux sont fréquemment représentés, et souvent associés aux symboles du pouvoir »*, explique Pierre Tallet. Plus tard dans l'histoire égyptienne, leur importance ne fera que croître, notamment à travers la figure de Rê, le dieu solaire, auquel le roi s'identifie, et dont la barque parcourt le ciel.

Analyse du bois. Mais le caractère très symbolique des premiers bateaux égyptiens fait s'interroger les archéologues : ont-ils réellement navigué ? Car tous ont été découverts dans un contexte funéraire. Le plus célèbre d'entre eux, la barque de Chéops, bateau de près de cinquante mètres de long mis au jour au pied de la pyramide du pharaon qui a régné vers 2600 av. J.-C. a même été retrouvé démonté.

Cela ne semble pas être le cas pour le bateau d'Abou Rawach. *« Nous avons retrouvé quelques fibres des liens en papyrus et en lin qui maintenaient les planches ensemble »*, indique Yann Tristant. L'analyse du bois délivrera peut-être des indices sur une navigation éventuelle. Mais pour l'instant, il est en phase de consolidation dans le laboratoire de conservation du futur musée de Gizeh.

Les spécialistes de l'histoire de la construction navale, en tout cas, se frottent les mains. Car l'état de ce bateau est excellent, grâce aux précautions des anciens Égyptiens, qui semblent l'avoir immédiatement enfoui sous le sable. *« Il devrait être possible d'étudier de très près les techniques de construction de tels bateaux*, explique Patrice Pomey, du centre Camille-Jullian à Aix-en-Provence. *Ceux d'Abydos sont plus complets, mais en plus mauvais état. »* ■

Instituts thématiques

Inserm

Institut national
de la santé et de la recherche médicale

ATELIER DE FORMATION 222

Organisateurs / Organizers: **Philippe Broët** *(Inserm U669, Hôpital Paul Brousse, Villejuif)*, **Emmanuelle Génin** *(Inserm U1078, CHRU Brest, UBO, Brest)*, **Anne-Louise Leutenegger** *(Inserm U946, Univ Paris Diderot, Paris)*

Méthodes statistiques et nouvelles stratégies de recherche de gènes impliqués dans les maladies communes à l'ère du séquençage haut débit

● **Phase I** ▸ Le point sur…
27-29 mai 2013 - **Bordeaux**

Objectifs

Si les années 90 ont été celles des marqueurs microsatellites, les années 2000 celles des SNPs, les prochaines années seront celles du séquençage haut débit d'exomes et de génomes complets. Ces changements de technologie qui se traduisent par un changement d'échelle dans le nombre de variables à analyser ont été accompagnés par des modifications des unités d'analyse.
Il semble important de faire le point sur les méthodes statistiques qui vont être développées pour utiliser de manière optimale ces nouvelles données, mettre en évidence des corrélations génotype-phénotype et mieux comprendre les facteurs génétiques affectant les traits complexes.

Public

Chercheurs, ingénieurs, doctorants en statistique génétique, génétique épidémiologique, bioinformatique, biologie moléculaire.
Les conférences seront données en anglais.

Programme

Recueil des données : aspects méthodologiques et éthiques. Les particularités des données de séquençage haut-débit et comment en tenir compte dans les études d'association. Les problèmes de dimensionnalité et de tests multiples. Les méthodes d'analyse disponibles et comment les choisir en fonction des données et de la problématique.

● **Phase II** ▸ **Maîtrise technique**
3-4 juin 2013 - **Villejuif**

Programme

Présentation des différents logiciels disponibles pour analyser les données de séquençage haut-débit et mettre en évidence les variants génétiques impliqués dans des phénotypes complexes sur des données cas-témoins ou familiales.

Sélection

15 candidats seront sélectionnés parmi les participants de la phase I.

Avec la participation de / with the participation of: Alexandre ALCAIS **(France)**, Ines BARROSO **(UK)**, Catherine BOURGAIN **(France)**, Françoise CLERGET **(France)**, David CONTI **(USA)**, Jean-Francois DELEUZE **(France)**, Florence DEMENAIS-DIAO **(France)**, Josée DUPUIS **(USA)**, Daniel GAUTHERET **(France)**, Jean-Pierre HUGOT **(France)**, Rémi KAZMA **(USA)**, Dan NICOLAE **(USA)**, Richard REDON **(France)**, Anne ROVELET-LECRUX **(France)**, David-Alexandre TREGOUET **(France)**, Eleftheria ZEGGINI **(UK)**

Statistical methods and new strategies for mapping genes involved in common diseases in the era of high throughput sequencing

● **Phase I** ▸ Critical assessment…
May 27-29, 2013 - **Bordeaux**

Aims

Whereas the nineties were the years of the microsatellites, the years 2000, the years of the SNPs, the upcoming years are going to be those of the next-generation sequencing of exomes and whole genomes. These technological changes will translate into changes in the number of variables to study but also in the units of analysis. The aim of this workshop is to present the new statistical methods that are under development to take full advantage of these data and allow the study of genotype-phenotype correlations to better understand the genetic component of complex traits.

Audience

Researchers, engineers, PhD students in statistical genetics, genetic epidemiology, bioinformatics and molecular biology.
Lectures will be given in English.

Program

Data collection : methodological and ethical aspects. The particularities of next-generation sequencing data and how to deal with them in disease association studies. The curse of dimentionality and the multiple testing issue raised. The different statistical methods available to analyse the data and how to select the most appropriate ones.

● **Phase II** ▸ **Technical workshop**
June 3-4 2013 - **Villejuif**

Program

The different statistical genetic software available to analyse next-generation sequencing data and evidence gene variants involved in complex traits using case-control or family data.

Selection

15 candidates will be selected among the Phase I participants.

DATE LIMITE D'INSCRIPTION **15 mars 2013**

REGISTRATION DEADLINE **March 15th 2013**

Renseignements et inscriptions **Information and registration**
Inserm Ateliers de formation 101 rue de Tolbiac 75654 Paris Cedex 13
Tel. +33 (0) 1 44 23 62 04 or 62 03 - Fax +33 (0) 1 44 23 62 93
ateliers@inserm.fr

ATELIER DE FORMATION 223

Organisateurs / Organizers: **John O'Quigley** *(UPMC, Paris)*, **Pascale Tubert-Bitter** *(INSERM, Villejuif)*, **Vivian Viallon** *(Univ. Lyon 1/IFSTTAR, Lyon)*

Evaluation des modèles prédictifs : adéquation aux observations et valeur prédictive

Phase I ▸ Le point sur…
29-31 Mai 2013 - **Bordeaux**

Objectifs

Bien que la question de l'évaluation des modèles prédictifs soit relativement ancienne, son traitement méthodologique a récemment connu des avancées majeures, motivées par la recherche et la validation des marqueurs biologiques d'une part (notamment suite à la diffusion des techniques dites à haut-débit) et la promesse d'une médecine personnalisée d'autre part (dont les modèles prédictifs constitueraient un des outils essentiels). En ce qui concerne les facteurs génétiques, dont un nombre important a pu être identifié pour certaines maladies complexes, leur contribution peut être jugée modérée et la question de la valeur prédictive des scores qui les incorporeraient bien réelle.
De nombreux critères d'évaluation ont récemment été proposés dans la littérature, la plupart visant à mesurer soit l'adéquation soit le pouvoir prédictif du modèle. La plupart de ces critères originaux ont par ailleurs été étendus à des types d'étude particuliers (cohorte avec données censurées, présence de risques compétitifs, etc...) Face à cette multitude de critères et extensions, il est essentiel de connaître leurs spécificités et leurs propriétés ainsi que de comprendre les liens qui les unissent.
L'objectif de l'atelier est de présenter théoriquement et pratiquement l'ensemble de ces récents développements, afin de contribuer à leur diffusion et à la maitrise de leur utilisation.

Public

Epidémiologistes; biostatisticiens; généticiens et cliniciens formés à l'analyse statistique.
Les conférences seront données en anglais.

Programme

Définition et propriétés des principaux critères d'évaluation de l'adéquation et du pouvoir prédictif des marqueurs ou des modèles prédictifs (courbes ROC, AUC, R2, predictiveness curve, etc...);
Différents designs d'étude; AUC «dépendante du temps»; cas des risques compétitifs, Apport d'un marqueur supplémentaire dans un modèle prédictif (mesures de reclassification : IDI, NRI); méthodes de ré-échantillonnage (cross-validation,...); validation et critères de type R2 (variation expliquée, valeur prédictive et adéquation du modèle, variation expliquée et importance des variables pour des données de survie, évaluation des modèles mixtes non linéaires,...); Exemples illustratifs (apports des marqueurs génétiques, cas du modèle de Cox dans une étude cas-cohorte, ...)

Phase II ▸ **Maîtrise technique**
05-07 Juin 2013 - **Villejuif**

Programme

Mise en œuvre de techniques présentées dans la phase théorique à l'aide de SAS et R :
Adéquation et évaluation du R2 (modèles simples, multivariés et conditionnels; modèles de Cox; modèles de Cox avec fragilités); Evaluation de la calibration d'un modèle prédictif en présence de données censurées; Evaluation de l'AUC et de l'AUC dépendante du temps; Apport de l'ajout d'un nouveau marqueur dans un score existant (mesures de reclassification, etc...)

Sélection

12 participants seront sélectionnés parmi les participants de la phase I.

Avec la participation de / with the participation of: Jacques Bénichou **(Rouen, France)**, Philippe Broët **(Paris, France)**, Tianxi Cai **(Bosto n, USA)**, Cécile Chauvel **(Paris, France)**, Thomas Gerds **(Copenhagen, Denmark)**, Hélène Jacqmin-Gadda **(Bordeaux, France)**, Héléna Marti-Soler **(Lausanne, Switzerland)**, France Mentré **(Paris, France)**, Martina Müller **(Munich, Germany)**, Babak Oskooei **(London, UK)**, John O'Quigley **(Paris, France)**, Michael Pencina **(Boston, USA)**, Michael Schemper **(Vienna, Austria)**, David Tregouet **(Paris,France)**, Vivian Viallon **(Lyon, France)**.

Evaluation of predictive models: goodness-of-fit and predictive power

Phase I ▸ Critical assessment…
May 29-31, 2013 - **Bordeaux**

Aims

How to evaluate predictive models is a quite old topic which has recently seen significant methodological advances, due to (i) the increasing interest in new biological markers (especially since the development of high-throughput technology) as well as (ii) the promises of a personalized medicine (for which predictive models would constitute an essential tool). In particular, many genetic markers have been identified for some complex diseases, but their impact is often considered as moderate, raising the question of the relevance of their incorporation in existing predictive risk scores.
Many evaluation criteria have recently been proposed in the literature, most of which aiming at measuring either the goodness-of-fit or the predictive power of a given model. Most of these criteria have further been extended to cope with specific study designs (cohort with censored data, presence of competive risks ...). Given these numerous criteria and extensions, it is of particular interest to be aware of their specificities and properties, as well as the various relationships that exist among them.
The main objective of this workshop is to present these criteria, from both a theoretical and practical point of view, in order to make their use proper and wider.

Audience

Epidemiologists and biostatisticians; Geneticists and clinicians trained in statistics.
Lectures will be given in English.

Program

Definition and properties of the main criteria measuring the goodness-of-fit or the predictive power of predictive models or markers (ROC, AUC, R2, predictiveness curve, etc...); various study designs; time-dependent AUC; competive risks; Interest of adding a new marker in an existing model (reclassification measures: IDI, NRI, ...); cross-validation and sub-sampling; R2-like criteria (explained variation, predictive power and goodness-of-fit, explained variation and relative importance of covariates in survival analysis, model evaluation in non-linear mixed-effect models). Illustrative examples (markers from genome, transcriptome and proteome, evaluation of a Cox model in a case-cohort study ...)

Phase II ▸ **Technical workshop**
June 05-07, 2013 - **Villejuif**

Program

Practical implementation of some of the criteria presented in Phase 1 with SAS and R:
Goodness of fit and evaluation of the R2 criterion (simple, multivariate and conditional models; Cox models; frailty (Cox) models); Evaluation of the calibration of a predictive model in the presence of censored data; Evaluation of the AUC and time-dependent AUC; Effect of adding a new marker in an existing risk score (reclassification measure, etc...).

Selection

12 participants will be selected among participants to phase I.

DATE LIMITE D'INSCRIPTION **15 mars 2013**
REGISTRATION DEADLINE **March 15th 2013**

Renseignements et inscriptions **Information and registration**
Inserm Ateliers de formation 101 rue de Tolbiac 75654 Paris Cedex 13
Tel. +33 (0) 1 44 23 62 04 or 62 03 - Fax +33 (0) 1 44 23 62 93
ateliers@inserm.fr

La nouvelle façon de se poser sur Mars

Pour faire atterrir son robot Curiosity sur le sol martien, la NASA a utilisé une nouvelle technique audacieuse, baptisée « grue volante ». Ce système, capable de déposer un engin d'une tonne au bout de trois filins, ouvre la voie à de futures missions plus ambitieuses encore.

PAR **Julien Bourdet,**
journaliste.

L'essentiel

> LA NASA est parvenue à poser sur Mars le plus gros rover jamais envoyé sur la planète Rouge.

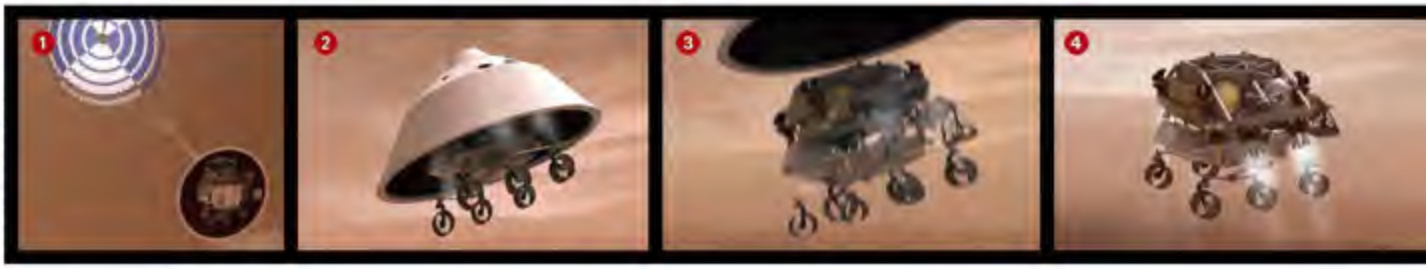
> LES INGÉNIEURS se sont inspirés des techniques employées par l'armée américaine avec ses hélicoptères baptisés « grues volantes ».

> CETTE TECHNOLOGIE permettra à terme de rapporter des échantillons de Mars en attendant, un jour, d'y envoyer des hommes.

Arrivé sur Mars le 6 août 2012, Curiosity, robot mobile de la NASA n'a pour le moment pas révolutionné notre connaissance de cette planète. Pourtant, l'agence spatiale américaine considère déjà la mission comme un immense succès. Pourquoi ? Parce qu'elle a réussi à faire atterrir sans encombre le plus gros rover de l'histoire de l'exploration martienne : près d'une tonne. Et qu'elle a ainsi démontré l'efficacité d'une nouvelle technique d'atterrissage automatique extraterrestre. Cette technique audacieuse a mis en œuvre une « grue volante » pour déposer tout en douceur le robot au bout de trois filins.

Jamais auparavant on n'était parvenu à poser un engin d'une telle masse sur le sol martien. Avec ce sans-faute, la grue volante devrait ainsi s'imposer pour les futures missions robotisées. Et elle pourrait même ouvrir la voie à des missions habitées sur la planète Rouge.

Atmosphère ténue. Faire atterrir une sonde sur Mars est un exercice périlleux, comme l'ont prouvé les échecs de plusieurs missions. La dernière en date fut Beagle 2, qui s'est écrasée au sol en 2003. La principale difficulté vient du fait que l'atmosphère martienne est très ténue : moins de 1 % de la pression de l'atmosphère terrestre. Résultat, l'utilisation d'un bouclier thermique, qui tire parti de la friction sur les couches atmosphériques, puis d'un parachute de très grande taille, comme on le fait pour le retour d'engins sur Terre, ne suffit pas pour frei-



© PHOTOS NASA/JPL-CALTECH

ner l'engin. Il faut faire appel à un dernier système pour le ralentir encore un peu plus et le poser sans danger.

Pour les deux précédents rovers, Spirit et Opportunity, arrivés sur Mars en 2004, la NASA avait mis au point un ingénieux système composé d'airbags géants. Gonflés juste avant l'atterrissage, les coussins d'air avaient amorti le choc final en rebondissant sur le sol à plusieurs reprises.

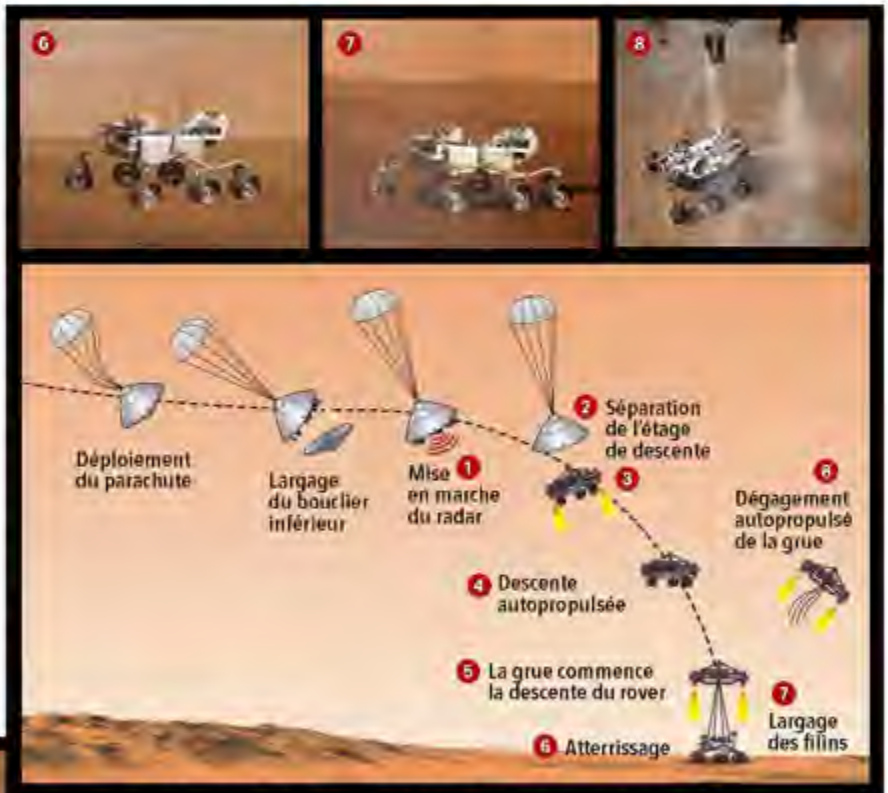
Mais pour Curiosity, l'idée de reprendre ce concept a vite été abandonnée. Avec une masse de 900 kilogrammes, soit cinq fois plus que ses prédécesseurs, le rover était bien trop lourd. En effet, cette technique nécessite, en plus des airbags, une enveloppe protectrice tout autour du robot qui représentait déjà deux fois la masse de Spirit ou d'Opportunity. Pour Curiosity, ce système aurait dû être encore plus massif. Inimaginable ! D'autant que le risque que le robot puisse percer ses propres airbags à l'atterrissage n'était pas totalement écarté.

Restait une autre solution, déjà éprouvée dans les années 1970 pour poser les deux sondes américaines Viking, de 570 kilogrammes chacune (les deux plus lourds engins martiens après Curiosity) : des moteurs fusées. Orientées vers le bas, ces rétrofusées étaient restées allumées jusqu'au contact avec la surface martienne pour contrecarrer la vitesse de chute. *« Mais là encore, le bilan en termes de masse n'est pas satisfaisant, car il faudrait mettre en place sur l'atterrisseur une imposante plate-forme avec des rampes pour faire débarquer un rover. Sans oublier qu'un tel débarquement reste un exercice dangereux, des rochers pouvant par exemple bloquer le déploiement des rampes et les rendre ainsi inutiles »*, explique Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Centre national d'études spatiales (CNES).

Scénario d'atterrissage. Dans la tête des ingénieurs de la NASA a émergé alors une nouvelle idée. Elle était inspirée par les hélicoptères de l'armée américaine baptisés « grue volante », capables de transporter et de déposer au sol des charges de plusieurs tonnes à l'extrémité d'un filin. Dans la version spatiale de cette grue volante, c'est un étage de descente propulsé par huit rétrofusées qui joue le rôle de l'hélicoptère. Cette fois, la masse à embarquer devient acceptable car le rover n'emporte avec lui aucune structure supplémentaire « inutile ».

Le scénario de l'atterrissage était le suivant : à environ 20 mètres du sol martien, cet étage ferait quasiment du surplace avant de faire descendre Curiosity au bout de trois câbles de 7,50 mètres de long en nylon hyperrésistant. Dix secondes plus tard, le rover toucherait la surface directement sur ses roues à moins de 75 centimètres par seconde. L'atterrissage serait extrêmement doux, le plus doux jamais réalisé sur Mars. Qui plus est, le robot mobile, qui n'aurait pas besoin de descendre d'une plate-forme, commencerait sa mission rapidement.

Aussi séduisante soit-elle, l'idée a d'abord été accueillie avec scep- >>>

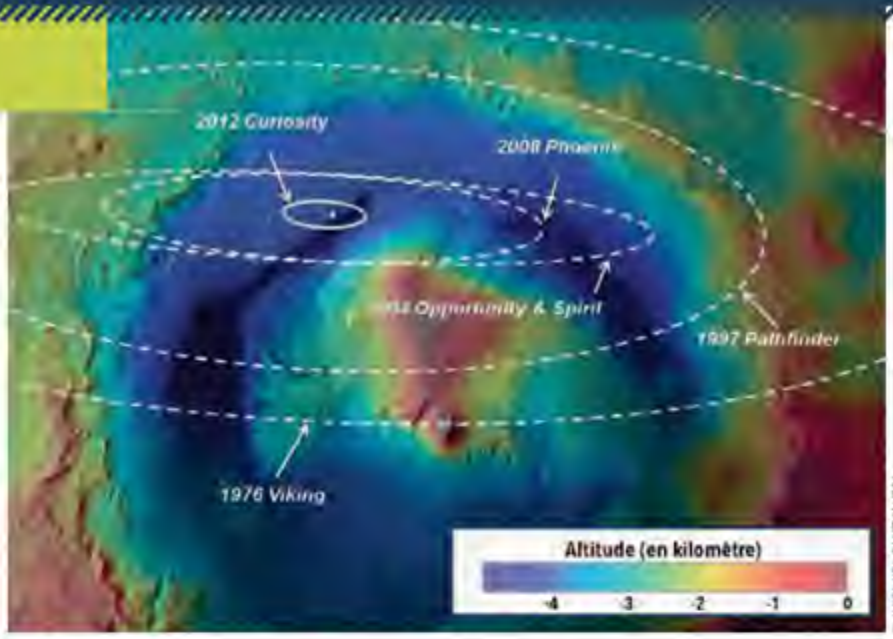


LES PRINCIPALES ÉTAPES DE L'ATTERRISSAGE

APRÈS SA DESCENTE sous un parachute, la sonde allume son radar, qui mesure sa vitesse et son altitude (1). À 2 kilomètres d'altitude et à 100 mètres par seconde, l'étage de descente, auquel est attaché le rover, se sépare de la capsule (2 et 3). Il allume ses 8 moteurs fusées pour ralentir (4), jusqu'à faire du quasi-surplace. À 20 mètres du sol, et à une vitesse de 75 centimètres par seconde seulement, l'étage commence à descendre le robot au bout de trois câbles longs de 7,50 mètres (5). L'engin dépose alors Curiosity en douceur (6). Les câbles sont coupés, ainsi que le « cordon ombilical » qui permettait à l'ordinateur de bord du rover de contrôler la manœuvre (7). L'étage de descente augmente la poussée de ses moteurs pour aller s'écraser à 150 mètres du lieu de l'atterrissage (8).

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

La nouvelle façon de se poser sur Mars



© NASA/JPL-CALTECH/ESA

Atterrissage de précision

En plus de la grue volante, la mission Curiosity a utilisé une autre innovation : son entrée dans l'atmosphère martienne était pilotée par de petits propulseurs. Alors que toutes les autres sondes martiennes se sont contentées de tomber dans l'atmosphère, Curiosity, en inclinant de 20° la pointe de son bouclier thermique en forme de cône, a créé une force de portance qui lui a permis de planer littéralement comme un avion. Les petits moteurs pouvaient alors corriger la trajectoire calculée en temps réel par des accéléromètres. Résultat : la zone probable d'atterrissage visée par Curiosity était très petite, une ellipse de 20 kilomètres sur 7, contre 100 kilomètres sur 20 pour Phoenix en 2008 et 150 kilomètres sur 20 pour Opportunity et Spirit (ci-dessus). Cette zone était encore plus grande pour les missions antérieures Pathfinder et Viking. En réalité, Curiosity s'est posé à 2,5 kilomètres seulement du centre de cette ellipse !

>>> ticisme. *« Certains jugeaient cette solution trop compliquée, pour ne pas dire folle,* se souvient Francis Rocard. *Ils avaient peur que les câbles lâchent, qu'ils ne se déroulent pas, ou encore que le robot se balance dangereusement comme un pendule ».* Mais des tests menés sous un hélicoptère et des milliers de simulations reproduisant les conditions d'atterrissage même les plus difficiles ont fini par convaincre les plus réticents.

Radar aveuglé. En réalité, la grue volante s'est même révélée le système le plus fiable jamais conçu pour poser sur Mars un engin du gabarit de Curiosity. Elle a résolu en effet un grand nombre de problèmes posés par les atterrisseurs précédents, et notamment par les sondes Viking, qui elles aussi ont fait appel à des moteurs fusées dans les derniers mètres de la descente. Pour atterrir, celles-ci ont coupé leurs moteurs au tout dernier moment, dès qu'un de leurs pieds a touché le sol. *« Le principal danger avec cette approche, c'est que le souffle des moteurs peut soulever énormément de poussières, aveuglant ainsi le radar qui donne à la sonde les informations indispensables d'altitude et de vitesse,* précise Pierre Bousquet, à la tête des projets de planétologie au CNES. *Ou pire, que les gaz rebondissent contre le sol et viennent déséquilibrer l'engin. Avec la grue volante, les moteurs sont loin du sol et n'interagissent pratiquement pas avec celui-ci, ce qui permet de garder le contrôle tout au long de la manœuvre, et ainsi d'atterrir très lentement. »*

Autre avantage : le fait que les moteurs de l'étage de descente soient au-dessus du rover a pour conséquence que le centre de gravité de l'ensemble est très bas, ce qui rend le système très stable, contrairement aux Viking où

Chronologie L'atterrissage automatique sur d'autres planètes

> FÉVRIER 1966

© RIA NOVOSTI

La sonde soviétique Luna 9 utilise des rétrofusées puis un airbag rudimentaire pour atterrir sur la Lune, devenant ainsi le premier engin à se poser ailleurs que sur Terre.

> JUIN 1966

Grâce à ses rétrofusées allumées jusqu'à quelques mètres de la surface, la sonde américaine Surveyor 1 réalise le premier véritable atterrissage en douceur sur la Lune, se posant à seulement 5 kilomètres par heure.

> 1970

© RIA NOVOSTI/AFP

À l'aide d'un bouclier thermique, puis d'un parachute, la sonde soviétique Venera 7 freine dans l'atmosphère extrêmement dense de Vénus avant d'atterrir sur la planète.

toute la masse se trouvait au-dessus des moteurs. Résultat : déposé avec la plus extrême douceur, Curiosity a atterri directement sur ses roues sans risque d'être endommagé. Comme les tests sur Terre l'ont montré, il pouvait même se poser sur un sol irrégulier : en pente (jusqu'à 15°) et parsemé de petits rochers (jusqu'à 50 centimètres de hauteur).

Échantillons martiens. Dotée d'autant de vertus, la grue volante ne devrait pas s'arrêter avec Curiosity. D'autant que les ingénieurs de la NASA planchent déjà sur une version plus musclée de cette technique. *« Les études montrent que nous pourrions déposer des engins deux fois plus lourds que Curiosity avec ce système »*, confie Robert Manning, ingénieur en chef de Curiosity à la NASA. La grue volante ouvrirait ainsi la voie à des missions robotisées sur la planète Rouge plus ambitieuses encore. À commencer par celle que tous les planétologues jugent comme une priorité : le retour d'échantillons martiens sur Terre, qui pourrait être réalisé dans les années 2020.

Un scénario est actuellement à l'étude à la NASA. Dans celui-ci, un premier rover de la taille de Curiosity se pose pour prélever les précieuses roches martiennes. Il est suivi d'un second atterrisseur qui comprend un robot plus léger chargé de récupérer les échantillons et une rampe de lancement pour remonter ces derniers jusqu'à un orbiteur qui les ramène sur Terre. *« Pour déposer deux engins aussi massifs sur Mars, le recours à la grue volante sera très certainement un passage obligé »*, confie Francis Rocard.

Ce système serait-il aussi utilisable pour faire atterrir des hommes sur Mars ? Au cours d'une telle mission, qui pourrait avoir lieu à l'horizon 2035 pour les prévisions les plus optimistes, les astronautes, une fois débarqués, habiteraient sur place pendant un an environ, le temps que la planète Rouge et la Terre soient dans la meilleure configuration possible pour entamer le retour. Les hommes devraient donc emporter avec eux, en plus du module habité, de grandes réserves de nourriture, d'eau et d'oxygène, et une centrale pour fabriquer de l'électricité. *« La grue volante ne s'imposera pas du tout pour le module habité,* juge Pierre Bousquet. *Pour son atterrissage, il pourra bénéficier de l'intervention des astronautes, beaucoup plus réactifs en cas de problème qu'un engin entièrement automatique, comme l'ont montré les missions Apollo. En revanche, on pourrait envisager d'utiliser cette méthode pour déposer certains modules de fret, les plus légers en tout cas. »*

Les modules les plus lourds, qui pèseront 20 tonnes au bas mot, seront en revanche hors de portée pour la grue volante. D'ailleurs, le concept qui permettrait de réaliser une telle performance reste à inventer. Mais en démontrant la possibilité de faire atterrir des engins de plus en plus lourds sur Mars, les ingénieurs de la NASA ont fait un pas de géant dans cette direction. ■

Curiosity prépare l'arrivée des hommes sur Mars

Curiosity a réalisé des mesures importantes en prévision de missions habitées :
– pendant son entrée dans l'atmosphère martienne, un instrument installé dans le bouclier thermique a enregistré les températures (plus de 2 000 °C) et les pressions auxquelles il était soumis. *« Les données vont nous permettre de mieux caractériser l'aérodynamique du vaisseau et la résistance du matériau qui constitue le bouclier thermique,* explique Michelle Munk, responsable de l'instrument à la NASA. *Nous pourrons ainsi mettre au point des capsules habitées plus légères par rapport aux concepts actuels, tout en conservant le même niveau de sécurité pour les astronautes » ;*
– un détecteur a mesuré le niveau de radiation lors du voyage de huit mois vers Mars et continuera à le faire sur la surface martienne pendant toute la durée de la mission. Ce flux de rayons cosmiques et de particules solaires est néfaste pour des astronautes qui y seraient exposés sur de longues périodes. On évaluera ainsi le niveau de protection minimale à mettre en place.

> 1971
L'atmosphère de Mars étant très ténue, la sonde soviétique Mars 3 utilise, en plus d'un bouclier thermique et d'un parachute, des rétrofusées à la fin de la descente.

© ESA MOVIESTI

> 1997
Pour déposer un rover sur Mars, la sonde de la NASA Mars Pathfinder utilise, dans la phase finale de l'atterrissage, des airbags géants qui amortissent le choc en rebondissant plusieurs fois sur le sol.

© PATHFINDER TEAM, JPL/NASA

> 2001
La sonde de la NASA Near Shoemaker parvient à se poser à la surface de l'astéroïde Eros, en effectuant une série de passages de plus en plus proches de l'objet et en coupant ses moteurs par intermittence pour ralentir au maximum.

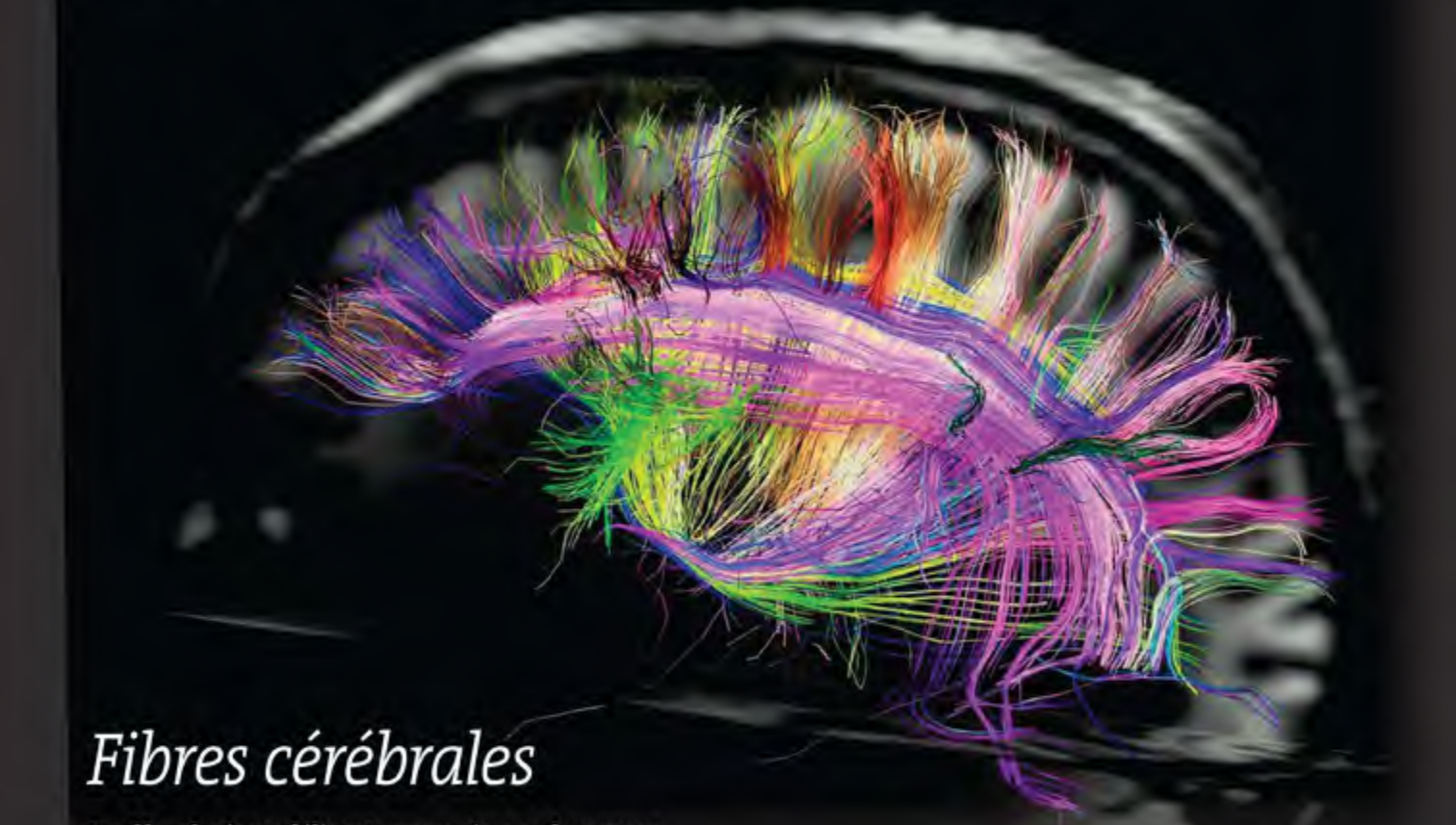
© JHU APL/NASA

Images de science

L'album de l'année

PAR Jacques Abadie, journaliste.

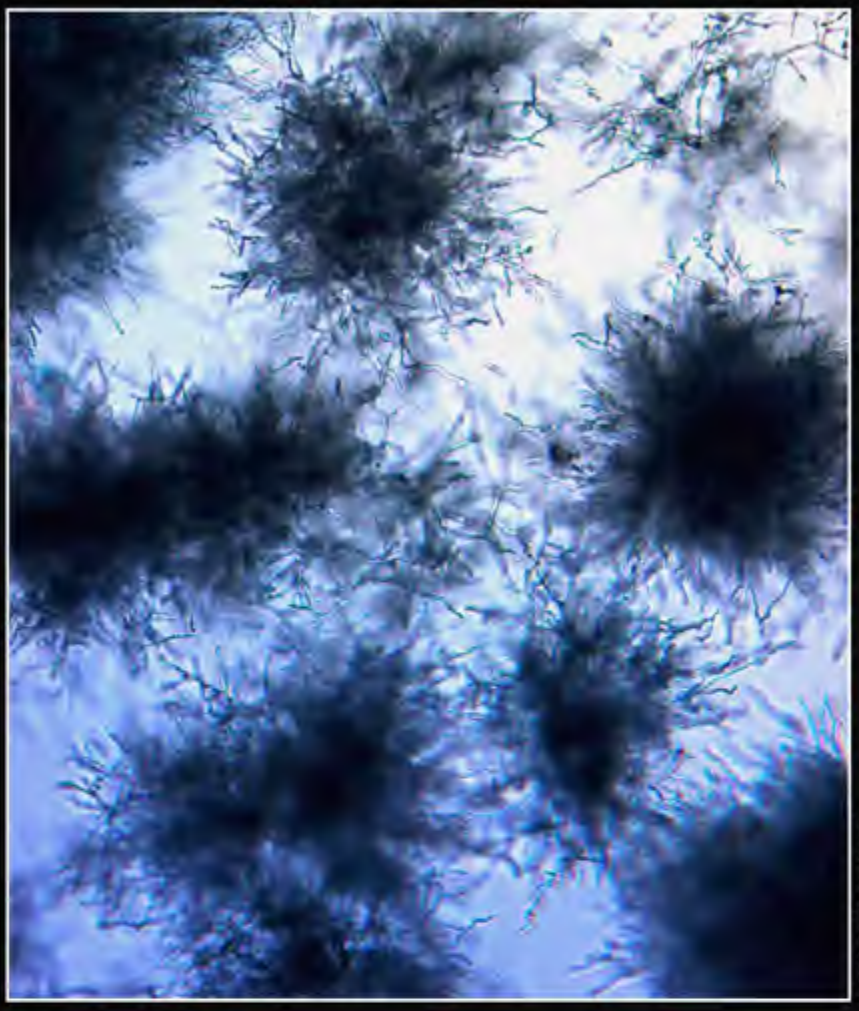
Un florilège d'images belles ou intrigantes vient compléter notre palmarès des découvertes de 2012.



Fibres cérébrales

Ces fils colorés modélisent, sur une image de cerveau en arrière-plan, les grands faisceaux de fibres neuronales qui constituent la matière blanche cérébrale. Pour construire cette représentation, une équipe américaine a examiné le cerveau de volontaires avec une méthode d'imagerie cérébrale très précise, « l'imagerie par résonance magnétique du tenseur de diffusion ». Puis, à partir des données obtenues, elle a reconstruit mathématiquement les faisceaux de fibres neuronales. Résultat : ils forment une grille en trois dimensions, structure géométrique bien plus simple qu'on ne l'imaginait. V. J. Weeden *et al.*, *Science*, *335*, 1628, 2012.

© COURTESY OF MGH-UCLA HUMAN CONNECTOME PROJECT



© COURTESY OF ILIYAN ILIEV

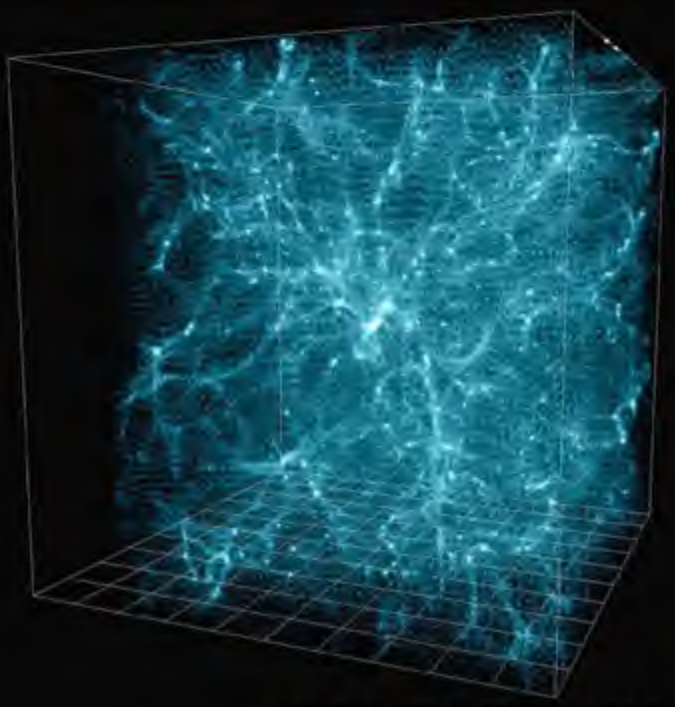
Champignons de souris

Ces champignons intestinaux observés au microscope, grands de seulement quelques micromètres, seraient liés à des maladies inflammatoires de l'intestin. Pour le montrer, des biologistes ont altéré chez des souris un gène impliqué dans la détection des champignons intestinaux par le système immunitaire. Puis ils ont provoqué chez ces animaux une maladie inflammatoire chronique de l'intestin, similaire à une pathologie dont souffre l'homme. Résultat : les souris génétiquement modifiées, plus vulnérables aux champignons, ont eu des symptômes inflammatoires plus sévères que des souris normales. En analysant les excréments des rongeurs, les chercheurs ont identifié plus de 100 espèces différentes de champignons intestinaux.

I. D. Iliev *et al.*, *Science*, *336*, 1314, 2012.

Univers simulé

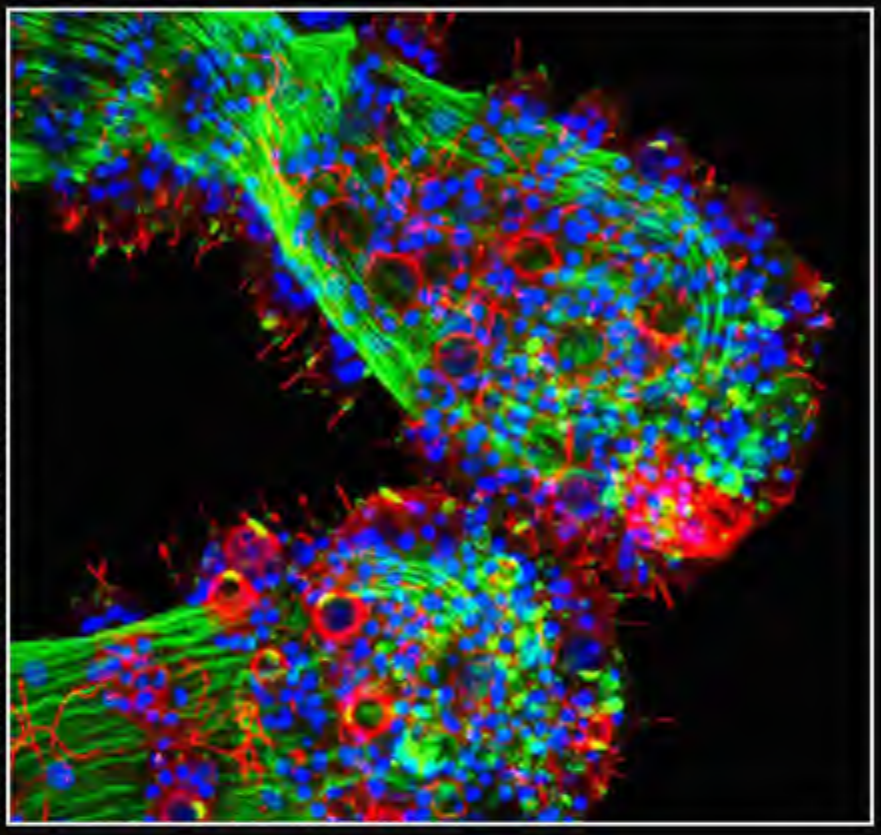
Voici une simulation numérique de la distribution de matière noire dans une région de l'Univers où se forment des galaxies et des amas de galaxies. Elle a été réalisée dans le cadre du projet français DEUS (acronyme anglais pour simulation de l'univers avec énergie noire), qui a modélisé pour la première fois la structure de tout l'Univers, du Big Bang à nos jours. Pour cela, les astrophysiciens ont utilisé un supercalculateur composé de plus de 92 000 processeurs. Cette simulation, qui s'appuie sur le modèle standard de la cosmologie, et deux autres simulations fondées sur d'autres modèles, permettra de préciser la nature de l'énergie noire, qui représente plus de 70 % du contenu énergétique de notre Univers. www.deus-consortium.org



© WWW.DEUS-CONSORTIUM.ORG

Images de science

Des tentacules pour voir



© DR. DAVID C. PLACHETZKI/UNIVERSITY OF CALIFORNIA (BMC BIOLOGY 2012, 10 : 17DOI : 10.1186/1741-7007-10-17)

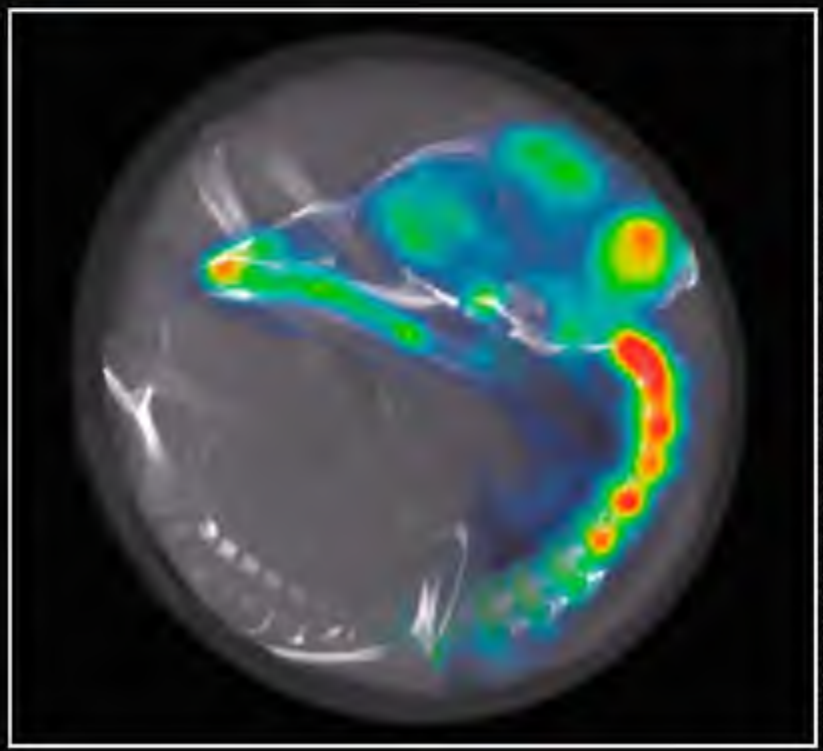
Voici les extrémités de deux tentacules d'hydre, petit organisme aquatique apparenté aux méduses, aux coraux et aux anémones de mer. Grâce à ces tentacules, dont les fibres musculaires apparaissent en vert, l'hydre est sensible à la lumière bien qu'il n'ait pas d'yeux. Comment ? Grâce à un circuit nerveux très simple relié à des cellules urticantes. L'activité de ces cellules (en rouge), qui permettent aux hydres de se défendre et d'attraper leurs proies, est régulée par des neurones sensoriels contenant de l'opsine. Or l'opsine (en bleu) est une protéine qui joue un rôle central dans la transmission de la lumière chez les animaux. Lorsqu'ils ont exposé des hydres à une lumière plus ou moins intense, les chercheurs ont constaté que leurs cellules urticantes s'activaient effectivement de façon variable.

D. C. Plachetzki *et al.*, *BMC Biology*, *10*, 17, 2012.

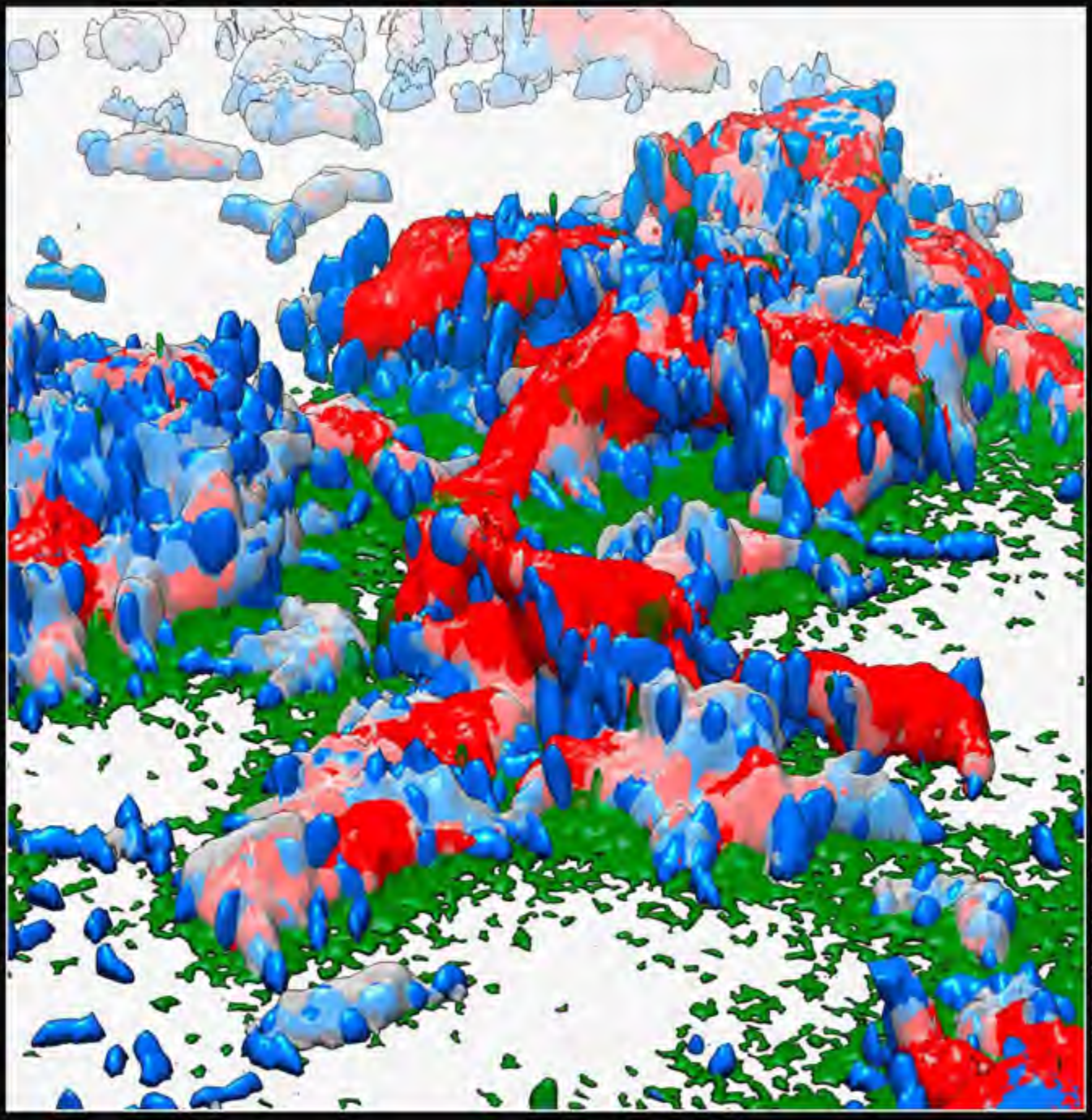
Embryon éveillé

Cette image d'un embryon de poulet dans son œuf a été obtenue avec deux techniques d'imagerie : un scanner à rayons X a fait apparaître le squelette (en gris), tandis que la tomographie par émissions de positrons a révélé l'activité du système nerveux (en couleurs). Grâce à cette méthode, les chercheurs ont observé que les embryons de poulet peuvent être réveillés avant leur naissance, pendant le dernier quart de leur vie embryonnaire. En effet, les embryons ont une activité cérébrale comparable à celle d'un poussin lorsqu'on diffuse des cris de poulet adulte près des œufs, mais pas quand les sons diffusés sont d'une autre nature.

E. Balaban *et al.*, *Current Biology*, 22, 1, 2012.



© IMAGE 3D RENDERING BY CARMEN GARCIA-VILLALBA / BALABAN ET AL. CURRENT BIOLOGY



© YEYSEL BERK/UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY

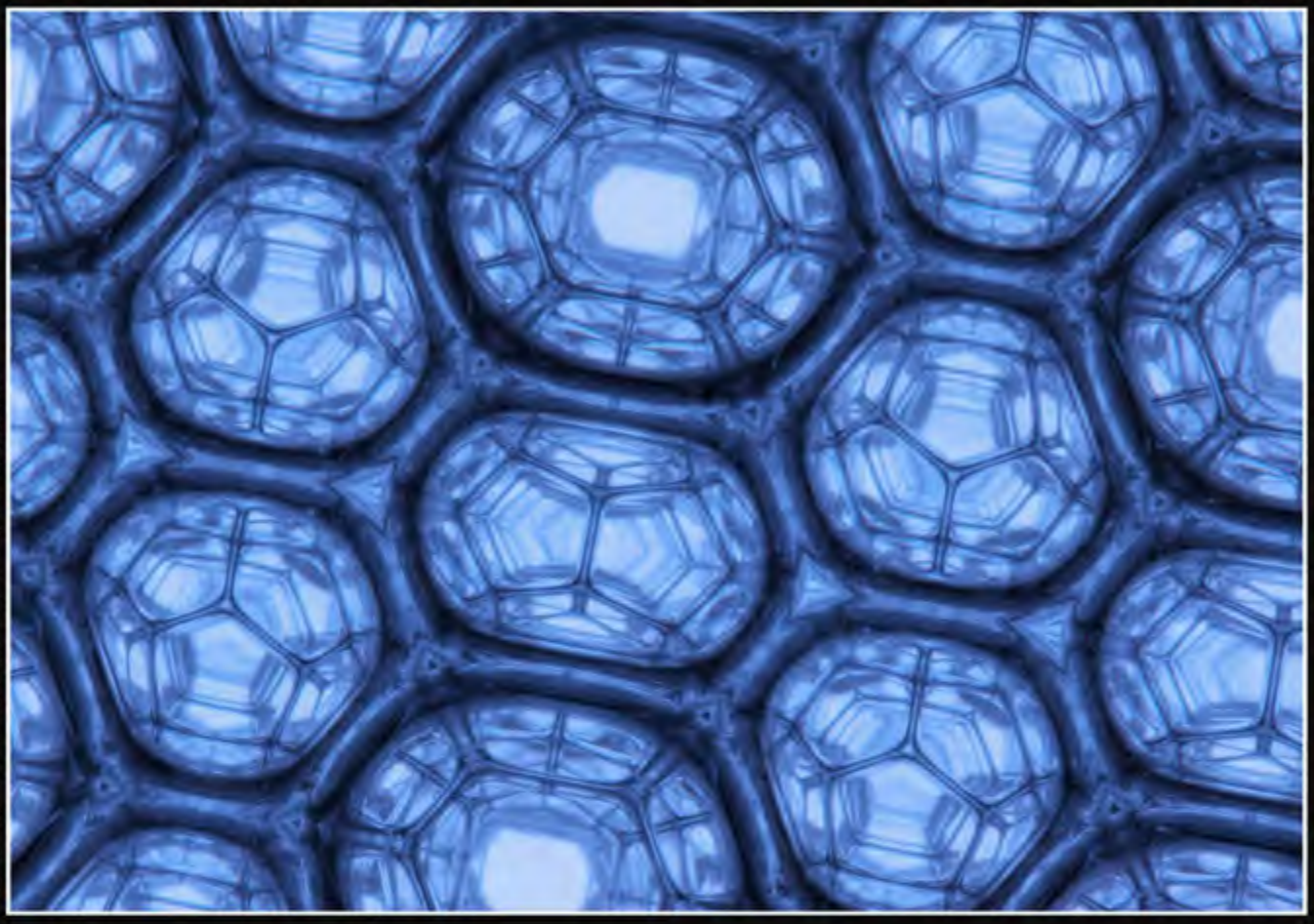
Biofilm bactérien

Voici la reconstruction en trois dimensions d'un agrégat de bactéries du choléra. Ce type d'organisation bactérienne, appelé « biofilm », adhère aux surfaces et rend les bactéries très résistantes aux antibiotiques. Pour mieux connaître la structure de ces biofilms, des biologistes américains et turcs ont utilisé des marqueurs fluorescents et une technique de microscopie à haute résolution. Leur analyse montre que les bactéries de choléra (en bleu) sont liées entre elles par une protéine qui joue le rôle de colle (en gris), et qu'elles adhèrent aux surfaces grâce à une autre protéine (en vert). L'agrégat est recouvert d'une couche protectrice (en rouge), composée de molécules de sucre et de protéines sécrétées par les bactéries.

Y. Berk et al., Science, 337, 6091, 2012.

Images de science

Mousse optimale



© FOAMS AND COMPLEX SYSTEMS GROUP, SCHOOL OF PHYSICS, TRINITY COLLEGE DUBLIN

Robot caméléon

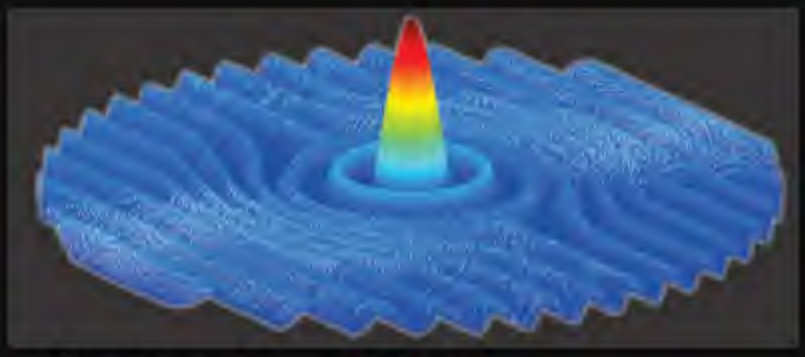
Ce robot souple en silicone est un as du camouflage : il peut changer de couleur en fonction de l'environnement, pour s'y fondre ou s'en démarquer. La machine, conçue par une équipe américaine, se déplace grâce à un système de canaux dans lequel est injecté de l'air. Un autre circuit de canaux, parcourus par des fluides colorés, permet de donner au robot les couleurs souhaitées. La température de ces fluides est également modifiable, si bien que le robot peut changer de teinte dans l'infrarouge. De tels robots pourraient par exemple aider des équipes de secours à rendre une victime visible au milieu de décombres.

S. A. Morin *et al.*, *Science*, *337*, 828, 2012.

© S. MORIN/HARVARD

Comment empiler des bulles de savon pour que leur surface totale soit la plus petite possible ? En faisant, comme ici, alterner des bulles de deux formes différentes : des polyèdres constitués de 12 faces et d'autres de 14 faces (dont deux hexagones). Cette mousse optimale dite de Weaire-Phelan était jusque-là un simple concept mathématique, découvert en 1994 grâce à des simulations numériques, mais elle n'avait jamais été fabriquée en laboratoire. Pour y parvenir, une équipe internationale de physiciens a en particulier mis au point un récipient dont la forme des parois permet de loger les bulles de Weaire-Phelan.

R. Gabbrielli *et al.*, *Phil. Mag. Lett.*, *92*, 1, 2012.



Chapeau espion

Ce dispositif théorique, baptisé « chapeau de Schrödinger », pourrait faciliter l'observation des particules quantiques. Dans le monde quantique, la mesure directe de la valeur d'une propriété d'une particule modifie celle-ci, si bien que la mesure devient immédiatement obsolète. Or les particules quantiques ont la spécificité de se comporter aussi comme des ondes. Le chapeau de Schrödinger piégerait en son centre une petite partie de ces ondes (en rouge) sans perturber la particule : il serait composé de matériaux capables de détourner les ondes, ce qui le rendrait « invisible » pour la particule quantique.

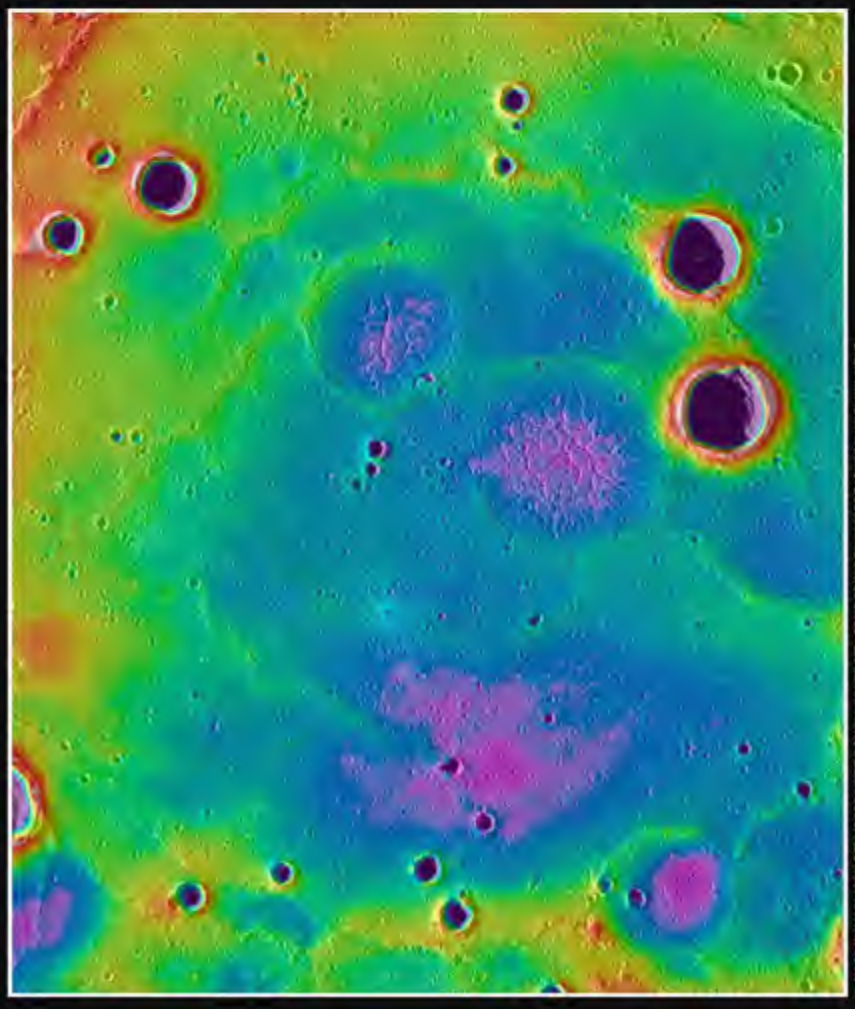
A. Greenleaf *et al.*, *PNAS*, *20*, 10169, 2012.

© G. UHLMANN/UNIVERSITY OF WASHINGTON

Plaines de Mercure

La sonde Messenger, de la NASA, a réalisé cette image topographique d'une ancienne plaine volcanique à la surface de Mercure. Cette plaine se situe dans l'hémisphère Nord de la planète, dont Messenger a livré la topographie la plus précise à ce jour. On distingue les cratères de volcans aujourd'hui éteints (en noir). Les zones les plus hautes apparaissent en blanc, les plus basses en violet. Les grandes plaines volcaniques, qui recouvrent 6 % de la surface de Mercure, se seraient formées il y 4 milliards d'années. Depuis cette époque, elles auraient été modifiées par une importante activité tectonique.

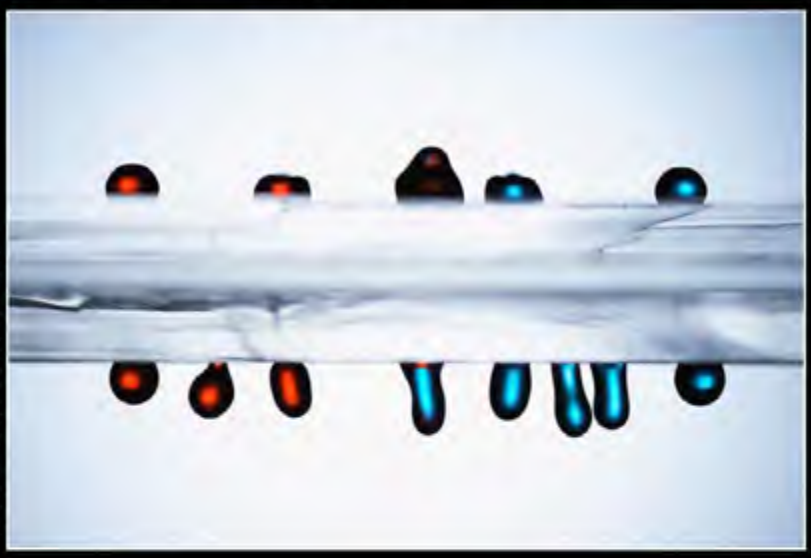
M. T. Zuber *et al.*, *Science*, *336*, 217, 2012.



© NASA/JHUAPL/CIW-DTM/GSFC/MIT/BROWN UNIVERSITY. RENDERING BY JAMES DICKSON AND JIM HEAD

Images de science

Gouttes voyageuses



© KARL BÖHRINGER/UNIVERSITY OF WASHINGTON

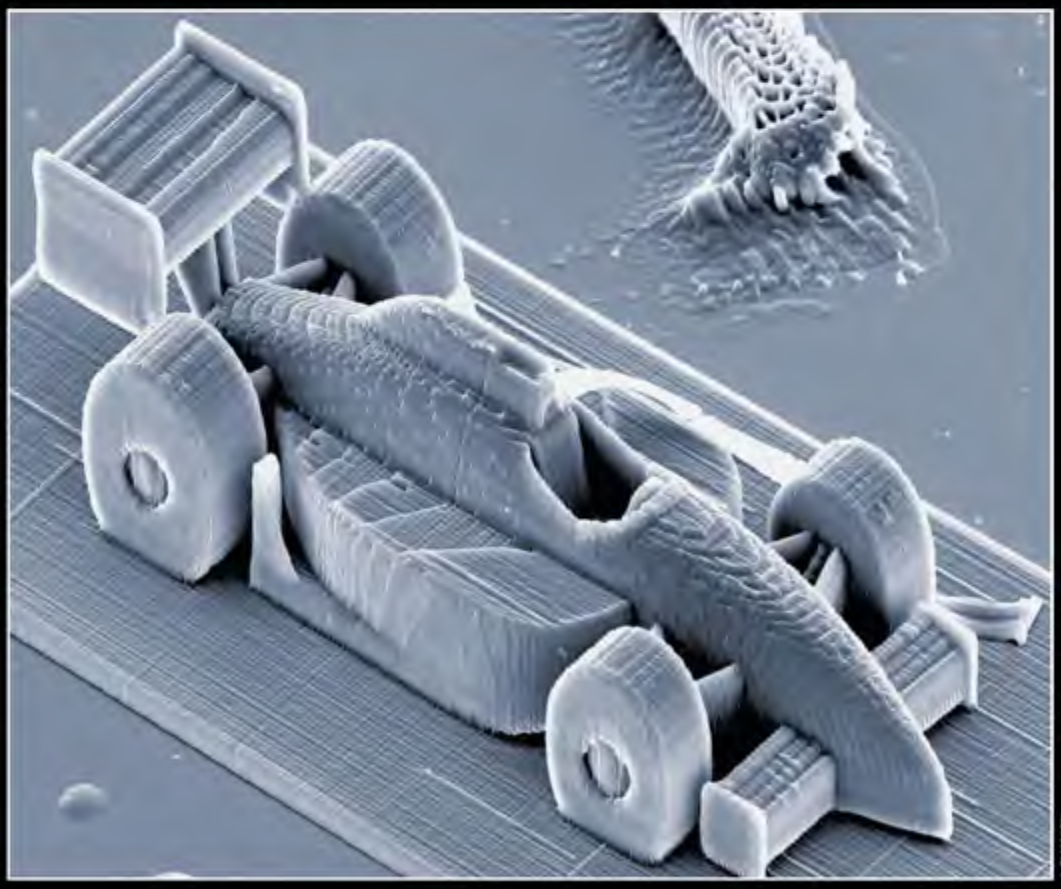
Comment déplacer ces gouttes liquides (en bleu et en rouge) sans qu'elles s'étalent ? Une équipe américaine a trouvé la solution, en s'inspirant des propriétés de la fleur de lotus. La surface de cette dernière est formée de minuscules pointes qui repoussent les gouttes d'eau. Les chercheurs ont donc élaboré une surface en silicone ayant la même architecture. Lorsqu'on fait vibrer cette surface avec le haut-parleur d'un téléphone mobile, les gouttes se déplacent tout en gardant leur forme sphérique. Ce dispositif permettrait de transporter et de mélanger avec une grande précision de petites quantités de liquides, pour le diagnostic médical par exemple.

T. A. Duncombe *et al.*, *Advanced Materials*, 12, 1545, 2012.

Voiture nanométrique

Ce modèle réduit de formule 1 est vraiment très réduit : il mesure moins de 300 micromètres de long. Il a été fabriqué par une équipe autrichienne au moyen d'une imprimante tridimensionnelle de haute précision. Cette dernière imprime des objets avec une résine liquide qui est durcie et sculptée par un rayon laser. Elle est particulièrement rapide : sa vitesse d'impression peut aller jusqu'à 5 mètres par seconde, contre quelques millimètres par seconde pour les autres imprimantes de ce type.

http://tinyurl.com/nano-voiture



© TU WIEN

Tempête estivale

© NASA/GODDARD/MODIS RAPID RESPONSE TEAM

Le centre d'une tempête au-dessus de l'Arctique a été photographié par le satellite Aqua, de la NASA, le 6 août dernier. Il s'agit d'un événement exceptionnel pour la saison : seulement huit tempêtes de cette force se sont produites en été dans cette région depuis les premières observations par satellite, il y a trente-quatre ans. Celle-ci, qui a duré environ deux semaines, aurait provoqué le détachement d'un pan de banquise, contribuant à la fonte des glaces en été. Elle expliquerait en partie la diminution record de la banquise arctique pendant l'été 2012.

http://tinyurl.com/nasa-tempete-arctique

Moustique résistant

Ce moustique survivra-t-il au choc de la goutte d'eau qui lui tombe dessus ? Oui, et une étude américaine a montré pourquoi. Les chercheurs ont placé six moustiques dans une cage où tombaient des gouttes d'eau, et ils les ont filmés avec des caméras prenant 4 000 images par seconde. Résultat : lorsqu'un moustique en vol rencontre une goutte, il est entraîné par elle en raison de sa faible masse, puis s'en détache juste avant de toucher le sol, où il atterrit sain et sauf. Il résisterait à l'accélération imposée par la goutte grâce à son squelette externe très solide.

A. K. Dickerson *et al.*, *PNAS*, *25*, 9822, 2012.

© T. NOWACK, A. DICKERSON & D. HU/GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

PRIX NOBEL

Le Français **Serge Haroche** a partagé le prix Nobel de physique avec l'Américain **David Wineland**. Ils ont tous deux développé des moyens de mesurer des systèmes quantiques simples pour ausculter les propriétés fondamentales de la lumière et de la matière.

« Nous rêvions de manipuler un photon sans le détruire »

LA RECHERCHE : Vous partagez cette année le prix Nobel de physique avec votre confrère américain David Wineland. Quels sont les points communs entre vos travaux ?

SERGE HAROCHE : Nos deux groupes travaillent dans le domaine que l'on appelle l'optique quantique, qui étudie les propriétés fondamentales des atomes et de la lumière en interaction. Avec Jean-Michel Raimond et Michel Brune, nous enfermons des photons, des grains de lumière, dans une boîte quantique. C'est-à-dire une cavité de quelques centimètres qui est recouverte de miroirs entre lesquels les photons rebondissent. Et nous nous servons d'atomes pour les observer. De son côté, le groupe de David Wineland piège des ions – des atomes débarrassés d'un électron –, et les sonde avec des particules de lumière. Nous travaillons donc des deux côtés d'un même miroir, pour ausculter les propriétés fondamentales de la lumière et de la matière, et étudier la manière dont on passe de l'échelle quantique à l'échelle macroscopique, celle de notre environnement quotidien, dont les propriétés sont très différentes. C'est notre capacité à manipuler sans les détruire des particules uniques, ions ou photons, que le Comité Nobel a choisie cette année de récompenser.

À quand remontent vos recherches primées cette année ?

S.H. Elles correspondent à deux étapes clés. La première remonte au milieu des années 1990 : nous avons réussi à l'époque à observer ce qu'on appelle la décohérence, le phénomène de disparition des effets quantiques provoquée par les interactions des systèmes quantiques microscopiques avec le monde macroscopique. La seconde, dix ans plus tard, nous a conduits à observer pour la première fois des photons sans les détruire. Mais le point de départ est le développement des lasers dans les années 1960. David Wineland et moi avons eu la chance de faire notre doctorat à cette époque extraordinaire. Grâce à ces sources de lumière, nous avons appris à manipuler et à sonder la matière avec une précision et une sensibilité inédites. Dans les années 1970, je me suis intéressé à des atomes d'un type particulier, dits de Rydberg. Quand un atome se trouve dans son état fondamental, les électrons les plus éloignés se trouvent à une distance d'environ 0,1 nanomètre du noyau. Dans un atome de Rydberg, souvent de rubidium, préparé à l'aide de champs électromagnétiques, on a amené le dernier électron sur une orbite située à une distance mille fois plus grande. Cet électron périphérique est alors très sensible à d'infimes perturbations électromagnétiques dans le domaine des micro-ondes. En quelque sorte, l'atome de Rydberg se comporte comme une antenne d'une extrême sensibilité. C'est l'espoir de parvenir à enfermer un photon dans une boîte et de le faire interagir avec un atome de Rydberg qui nous a guidés depuis plus de trente ans.

« Nous avons eu la chance de débuter à l'époque extraordinaire du développement des lasers »

Quel a été le premier apport de ces boîtes quantiques, qui sont au cœur de toutes vos recherches ?

S.H. En 1935, Erwin Schrödinger avait proposé une expérience de pensée pour illustrer la manière dont un système quantique peut être couplé avec le monde macroscopique. Il avait imaginé, par provocation, de lier le destin d'un chat enfermé dans une boîte fictive, totalement isolée du monde extérieur, à celui d'un atome excité qui, quand il perd de l'énergie, casse une ampoule de poison qui tue l'animal. De cette manière, quand l'atome est excité, le chat est vivant, et quand il ne l'est plus, le chat est mort. C'est ce que l'on appelle l'intrication : le chat et l'atome ne peuvent plus être décrits séparément, ils sont deux facettes d'un même système cou-

© MICHEL EULER/AP/SIPA

plé. À notre échelle, macroscopique, tout dispositif est dans un état bien défini, un chat est donc vivant ou mort. Mais à l'échelle quantique, les particules sont dans une superposition d'états possibles ; l'atome est excité et non excité. Le chat de Schrödinger est donc vivant et mort à la fois, du moins tant que le phénomène de décohérence ne détruit pas l'intrication.

Au milieu des années 1990, nous avons pu réaliser cette expérience du chat, en enfermant dans notre boîte quantique un champ constitué de quelques photons qui étaient intriqués avec un atome de Rydberg. David Wineland a fait la même chose avec quelques ions piégés. Nos deux groupes ont aussi observé un signal caractéristique de la décohérence qui détruit les superpositions d'état d'autant plus vite que ces « ersatz » de chat de Schrödinger contiennent plus de particules.

En 2005, vous réussissez une prouesse : observer un photon sans le détruire. Racontez-nous ces dix ans d'efforts.

S.H. Le photon pose un problème en physique quantique : quand un détecteur le voit, c'est parce qu'il l'a absorbé ; la mesure est donc destructrice. Dès le début des années 1990, nous avions imaginé, avec Jean-Michel Raimond, Michel Brune et des collègues théoriciens brésiliens, Luiz Davidovich et Nicim Zagury, de faire interagir des photons et des atomes de Rydberg de manière si subtile que les grains de lumière ne seraient pas détruits. Mais il fallait pour cela que le photon survive assez longtemps avant d'être absorbé par les miroirs en niobium de notre boîte quantique, matériau choisi pour ses propriétés dans le domaine des micro-ondes. Il fallait prolonger la survie du photon bien au-delà de la centaine de microsecondes, la durée qu'on obtenait à l'époque. La solution est venue d'une collaboration avec un laboratoire du CEA, qui a proposé de fabriquer des miroirs en cuivre, plus faciles à usiner pour obtenir un état de surface quasi parfait, et recouverts ensuite de niobium. Un jour de 2006, Michel Brune est entré dans mon bureau avec une boîte capable de garder les photons, en moyenne, pendant 130 millisecondes. Soit deux milliards de rebonds entre les miroirs ! C'était au-delà de nos espérances, et nous avons pu cette année-là observer pour la première fois un photon sans le détruire, et même compter les photons – jusqu'à 7 – quand ils sont plusieurs en même temps dans la cavité. Nous avons pu également observer la disparition soudaine des photons lorsqu'ils sont absorbés dans les parois de notre boîte, qui se produit sous forme de saut quantique, à un instant restant par essence aléatoire. Dès qu'un événement survient, nous pouvons à présent le détecter immédiatement, et le >>>

SERGE HAROCHE EN 8 DATES

1944
Naît à Casablanca, au Maroc.

1963
Intègre l'École normale supérieure de Paris (ENS).

1967-1984
Est chercheur au CNRS, maître de conférences à Polytechnique et professeur à l'université Paris-VI.

1994-2001
Dirige le groupe d'électrodynamique quantique au laboratoire Kastler-Brossel du département de physique de l'ENS.

2001
Nommé professeur au Collège de France dans la chaire de physique quantique.

2009
Reçoit la médaille d'or du CNRS.

2012
Nommé administrateur du Collège de France.

2012
Reçoit le prix Nobel avec David Wineland.

« Nous rêvions de manipuler un photon sans le détruire »

>>> compenser à volonté en rétablissant le nombre de photons initial.

Voulez-vous dire qu'on sait contrôler la quantité de photons à une unité près, comme on régule la température d'une pièce avec un thermostat ?

S.H. C'est exactement ça. Nous savons maintenir jusqu'à 7 photons dans une cavité, de manière indéfinie. Chaque fois que l'un d'entre eux disparaît ou apparaît, nous en sommes avertis et pouvons en introduire un nouveau pour le remplacer, ou en retirer un. La différence avec un régulateur à l'échelle macroscopique – et c'est toute la complexité de ces expériences –, c'est que chaque observation perturbe le système, même si elle ne détruit pas les photons. Il faut donc tenir compte de cette perturbation dans le système de rétroaction. Tout cela n'est possible que parce qu'on dispose d'ordinateurs capables de gérer de grandes quantités de données en temps réel. Ils nous ont aussi permis, en 2008, de réaliser un véritable film qui montre la décohérence à l'œuvre dans un petit système quantique.

La capacité à créer, observer, conserver et effacer des atomes ou des photons à l'unité près a-t-elle des retombées concrètes ?

S.H. Longtemps, il s'agissait surtout d'étudier des concepts, comme le chat de Schrödinger. Mais au fil des progrès, des applications sont apparues que personne ne soupçonnait. David Wineland a ainsi pu construire une horloge cent fois plus précise que les horloges à césium les plus performantes à ce jour : elle ne dérive que d'une demi-douzaine de secondes en 13 milliards d'années, l'équivalent de l'âge de l'Univers. C'est un instrument qui fera progresser l'étude de la gravitation et de la relativité.

L'optique quantique a également engendré une discipline nouvelle, l'information quantique, avec des applications concrètes, telle la cryptographie, et l'espoir de construire un ordinateur quantique : si on savait conserver assez longtemps un système quantique formé de centaines ou de milliers d'atomes placés chacun dans leur propre superposition d'états, nous disposerions d'une puissance fantastique pour certains calculs, comme la factorisation de grands nombres. Nous en sommes très loin aujourd'hui, car la décohérence est d'autant plus gênante que le nombre d'éléments quantiques est important. C'est là que le savoir-faire que nous avons développé sur la régulation du nombre de photons dans une boîte quantique peut donner des idées pour l'avenir.

L'ordinateur quantique n'est donc plus un fantasme ?

S.H. Je reste un peu sceptique, en particulier sur la capacité à réaliser ce que les Anglo-Saxons appellent la *scalability*. C'est une propriété essentielle qui consiste, une fois qu'on dispose d'un circuit élémentaire et fonctionnel, à en augmenter le nombre pour obtenir un fonctionnement à grande échelle. Tout comme on assemble des transistors pour faire des puces. Il y a des pistes, comme ce qu'on appelle l'électrodynamique quantique de circuits. Au lieu d'utiliser des ions ou des photons, on crée des atomes artificiels très simples, avec seulement deux niveaux d'énergie ; ils se présentent sous la forme de circuits minuscules qu'on assemble pour réaliser des expériences. Il y a dix ans, cette discipline était dans les limbes, très loin de ce qu'on faisait avec des ions ou des photons. Aujourd'hui, le retard de ces atomes artificiels sur les atomes réels est comblé. Mais la décohérence reste un énorme obstacle. Je pense qu'il manque encore une idée radicale qui viendra probablement d'un autre domaine, sans qu'on sache lequel. Quand le laser a été inventé, personne n'imaginait qu'il puisse révolutionner la communication. Et il y a eu une convergence, presque fortuite, entre les lasers, la fibre optique et les puces informatiques, pour créer nos systèmes de télécommunications.

« De l'optique quantique est née l'information quantique, discipline donnant des applications, telle la cryptographie »

De la même manière, la résonance magnétique est devenue une technique d'imagerie parce qu'on a découvert les aimants supraconducteurs et que l'informatique a permis de traiter les images. C'est pour cela qu'il faut laisser la recherche fondamentale libre d'aller dans toutes les directions.

Vous étiez l'élève de Claude Cohen-Tannoudji, Nobel en 1997, qui avait été élève d'Alfred Kastler, Nobel en 1966. Comment expliquer cette lignée unique ?

S.H. Cela tient à la particularité d'une structure comme l'École normale supérieure, qui dispose d'un important vivier d'étudiants. Surtout, elle permet aux chercheurs confirmés de continuer à travailler ensemble, en combinant leurs compétences, sans exiger qu'ils aient chacun leur projet indépendant. Tout ce que j'ai réalisé, c'est grâce à ma collaboration avec Jean-Michel Raimond depuis les années 1970, et avec Michel Brune, qui nous a rejoints à la fin des années 1980 et, bien sûr, avec tous les étudiants et post-doctorants qui nous ont accompagnés dans cette aventure. Le travail d'équipe poursuivi dans la confiance sur le long terme a été essentiel à notre succès. C'est exactement ce qui se passe au National Institute of Standard and Technology de Boulder, aux États-Unis, où David Wineland est installé. Sa réussite est, elle aussi, le fruit d'un travail de longue haleine avec un groupe de chercheurs confirmés. La loi du prix Nobel est que l'on distingue le chef du groupe, mais il faut bien comprendre que c'est le travail de toute l'équipe qui est derrière les travaux récompensés. Je suis sûr que David Wineland partage mon sentiment à ce sujet. ■

Propos recueillis par Denis Delbecq

MÉDECINE Le prix Nobel a été décerné à un biologiste britannique et à un médecin japonais pour leurs travaux révolutionnaires sur la reprogrammation cellulaire.

Retour à l'état embryonnaire pour des cellules adultes

« *La démonstration que l'on peut reprogrammer une cellule adulte pour la faire revenir à l'état embryonnaire a radicalement changé notre manière de voir le développement et la spécialisation cellulaire* », a déclaré l'institut Karolinska de Stockholm, qui désigne les lauréats du prix Nobel de physiologie et de médecine. Les découvertes récompensées cette année sont effectivement de celles qui révolutionnent la biologie et font faire un bond en avant à la médecine.

Au début du développement, les cellules sont toutes identiques, ou indifférenciées ; puis elles se différencient petit à petit et se spécialisent selon les organes dont elles font partie. On considérait ce processus de maturation irréversible, jusqu'à l'expérience pionnière de Sir John Gurdon, devenue un classique des manuels de biologie. En 1962, ce biologiste de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, remplaçait le noyau d'un ovocyte de grenouille par celui d'une cellule différenciée, provenant de l'intestin d'un têtard. L'ovocyte ainsi modifié s'est développé en donnant un têtard entier ! Cela démontrait qu'une cellule mature conserve sa potentialité à se développer en un organisme pleinement fonctionnel – ce qu'on appelle la pluripotence. Cette découverte allait mener au clonage de plusieurs mammifères, dont la brebis Dolly en 1996.

Quatre décennies plus tard, personne n'avait encore percé le secret qui pouvait faire retrouver sa pluripotence à une cellule adulte complète. Shinya Yamanaka, de l'université de Kyoto, trouve la bonne formule en 2006. Alors qu'il étudiait les gènes qui régulent la différenciation, il découvre que quatre gènes seulement, injectés dans des cellules adultes de souris, les retransforment en cellules indifférenciées : il baptise ces dernières « cellules souches pluripotentes induites » (iPS). En 2007, il répète l'expérience à partir de cellules de peau prélevées à une femme. Immédiatement, la découverte est applaudie comme une avancée majeure. « *Avec mes collègues, nous avons pressenti qu'il aurait le prix Nobel, parce que c'était un bouleversement pour tous les biologistes cellulaires* », raconte Marc Peschanski, directeur scientifique de l'institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques, à Évry.

Les cellules iPS contiennent des promesses inouïes pour la médecine. « *Aujourd'hui, on peut en dériver des dizaines de types de cellules, des neurones aux cellules intestinales, et étudier des maladies génétiques jusqu'ici impossibles à représenter en laboratoire* », explique Marc Peschanski. De plus, elles sont déjà utilisables pour des greffes de peau et, à l'avenir, elles pourraient permettre de faire toutes sortes de greffes cellulaires, avec une compatibilité de 100 % entre donneur et receveur. ■ Fiorenza Gracci

© WELLCOME LIBRARY, LONDON - CHRIS GOODFELLOW/GLADSTONES INSTITUTES

CHIMIE Robert Lefkowitz et Brian Kobilka sont récompensés pour leurs recherches sur le fonctionnement des récepteurs cellulaires les plus importants dans le corps humain.

Les clés de la communication entre cellules

Les cellules captent des signaux chimiques dans leur environnement grâce à des protéines présentes sur leur surface, appelées « récepteurs ». Comme les serrures avec les clés, ces récepteurs reconnaissent des substances spécifiques. Ils déclenchent ensuite une cascade de réactions à l'intérieur de la cellule, activant ainsi une réponse adaptée. Le prix Nobel de chimie récompense des travaux sur la structure et sur le fonctionnement d'une catégorie importante de récepteurs, ceux qui agissent *via* des molécules appelées protéines G.

On trouve dans le corps humain environ un millier de récepteurs différents couplés aux protéines G. Distribués dans les organes les plus divers, certains reconnaissent des hormones, comme l'adrénaline dans les muscles et le cœur, d'autres des neuromédiateurs tels que la sérotonine dans le cerveau, d'autres encore des odeurs et des saveurs. Mais également la lumière : la rhodopsine, qui assure la perception visuelle sur la rétine, est aussi un récepteur couplé aux protéines G.

En 1980, Robert Lefkowitz, médecin chercheur à >>>

© TED RICHARDSON/AP/SIPA - COURTESY STANFORD UNIVERSITY

PRIX NOBEL

>>> l'université Duke, aux États-Unis, dirigeait l'équipe qui parvint la première à identifier le gène d'un récepteur couplé aux protéines G et à le séquencer. Il s'agissait du récepteur de l'adrénaline appelé bêta-adrénergique. L'équipe en déduisit sa structure : un bouquet formé par sept hélices traversant la membrane cellulaire, combiné à une protéine G dans la face interne. Par la suite, cette même forme a été retrouvée chez tous les récepteurs couplés à des protéines G. *« Cela montre qu'il s'agit d'une famille de récepteurs apparentés,* explique Joël Bockaert, de l'institut de génomique fonctionnelle (IGF), à Montpellier. *Présents dans les premiers organismes animaux, ils se sont différenciés au fil de l'évolution pour remplir toutes sortes de fonctions qui servent aux cellules pour communiquer. »*

Sur ces bases, Brian Kobilka, élève de Robert Lefkowitz, a poursuivi, à l'université Stanford, les recherches sur le récepteur bêta-adrénergique. Son objectif : détailler sa structure à l'échelle des atomes, et comprendre comment celle-ci se modifie lorsqu'il se lie à l'adrénaline. La tâche était de taille, car il fallait tout d'abord obtenir un cristal du récepteur, pour ensuite l'observer par cristallographie aux rayons X. Or, la membrane cellulaire, dans laquelle sont logés les récepteurs, est quasi impossible à cristalliser.

Brian Kobilka a réussi l'exploit en 2007, grâce à un ingénieux outil biomoléculaire. *« C'est un cube composé de petits cubes, un peu comme celui de Rubik, formé de membrane cellulaire dans laquelle une grande quantité de récepteurs sont distribués uniformément,* détaille Jean-Philippe Pin, aussi de l'IGF. *Cela a ouvert une brèche dans la recherche. »* Trois ans plus tard, l'équipe a observé la modification du récepteur lorsque l'adrénaline s'y combine : la protéine G associée s'ouvre, devenant chimiquement active.

Des anti-histaminiques aux bêta-bloquants, 40 % des médicaments actuels visent un récepteur de cette famille. *« Ces progrès permettront de développer des médicaments ciblés plus finement, pour soigner un éventail de pathologies encore plus large,* souligne Jean-Philippe Pin. *Un médicament contre la maladie de Parkinson a déjà été fabriqué de la sorte par une équipe britannique. »* ■ F. G.

ÉCONOMIE Deux chercheurs américains ont été récompensés cette année pour leurs travaux sur les échanges économiques où les prix n'interviennent pas.

Le choix mutuel en algorithme

Mariage, admission à une école, recrutement professionnel : dans la vie, de nombreuses situations nécessitent que deux acteurs se choisissent mutuellement. *« Optimiser ces appariements pose un problème économique particulier, dès lors qu'on exclut de les résoudre par des échanges d'argent »,* note Eduardo Perez, du département d'économie de l'École polytechnique. C'est tout l'intérêt des travaux lauréats du Prix de la Banque de Suède pour les sciences économiques, en mémoire d'Alfred Nobel.

Deux économistes américains partagent ce prix. Le premier, Lloyd Shapley, est un mathématicien spécialiste de la théorie des jeux coopératifs, à l'université de Californie, à Los Angeles. On lui doit un algorithme qui assure toujours un appariement stable au sein d'un groupe. Développé en 1962, avec son collègue David Gale, sur l'exemple du mariage, son principe est l'« acceptation différée » : d'abord le temps est laissé à chacun d'exprimer ses préférences ; les unions sont célébrées ensuite. Une personne refusée par son partenaire préféré fait une demande au deuxième partenaire préféré, et ainsi de suite : à la fin, la stabilité des unions est mathématiquement garantie, car personne ne pourrait changer pour un meilleur choix.

Vingt ans plus tard, l'économiste Alvin Roth, aujourd'hui à l'université Harvard, étudiait l'entrée en spécialisation des médecins fraîchement diplômés, sur les marchés britannique et américain. *« Il remarqua que parmi les différents systèmes mis en place pour attribuer les médecins aux hôpitaux, seuls ceux qui aboutissaient à des appariements stables fonctionnaient bien »,* explique Eduardo Perez. Les autres étaient souvent détournés par certains postulants. Par exemple, en désignant comme leur préféré un hôpital où ils avaient peu de possibilités d'être admis, ils augmentaient leurs chances pour leurs deuxième et troisième choix.

Alvin Roth montre que les algorithmes sur le modèle de Gale-Shapley satisfont bien les vraies préférences, et que les candidats n'ont rien à gagner à mentir. Ainsi, aux États-Unis, un système qu'il a perfectionné a été adopté en 1997. *« Cet algorithme prend aussi en compte des préférences plus compliquées, comme celles des couples de médecins qui ne souhaitent pas être séparés géographiquement »,* ajoute Eduardo Perez.

Enfin, les demandeurs de greffes de reins bénéficient aussi de ces travaux. Plusieurs États américains appliquent déjà un système d'appariement conçu par Alvin Roth, qui fait correspondre le maximum de patients en attente avec des donneurs volontaires compatibles. Le nombre de greffés a déjà augmenté. ■ F. G.

© REED SAXON/AP/SIPA - COURTESY STANFORD UNIVERSITY

11. La mobilité individuelle

Cahier spécial réalisé avec le soutien de la direction scientifique de TOTAL

CHERCHEURS D'ÉNERGIES

TECHNOLOGIE

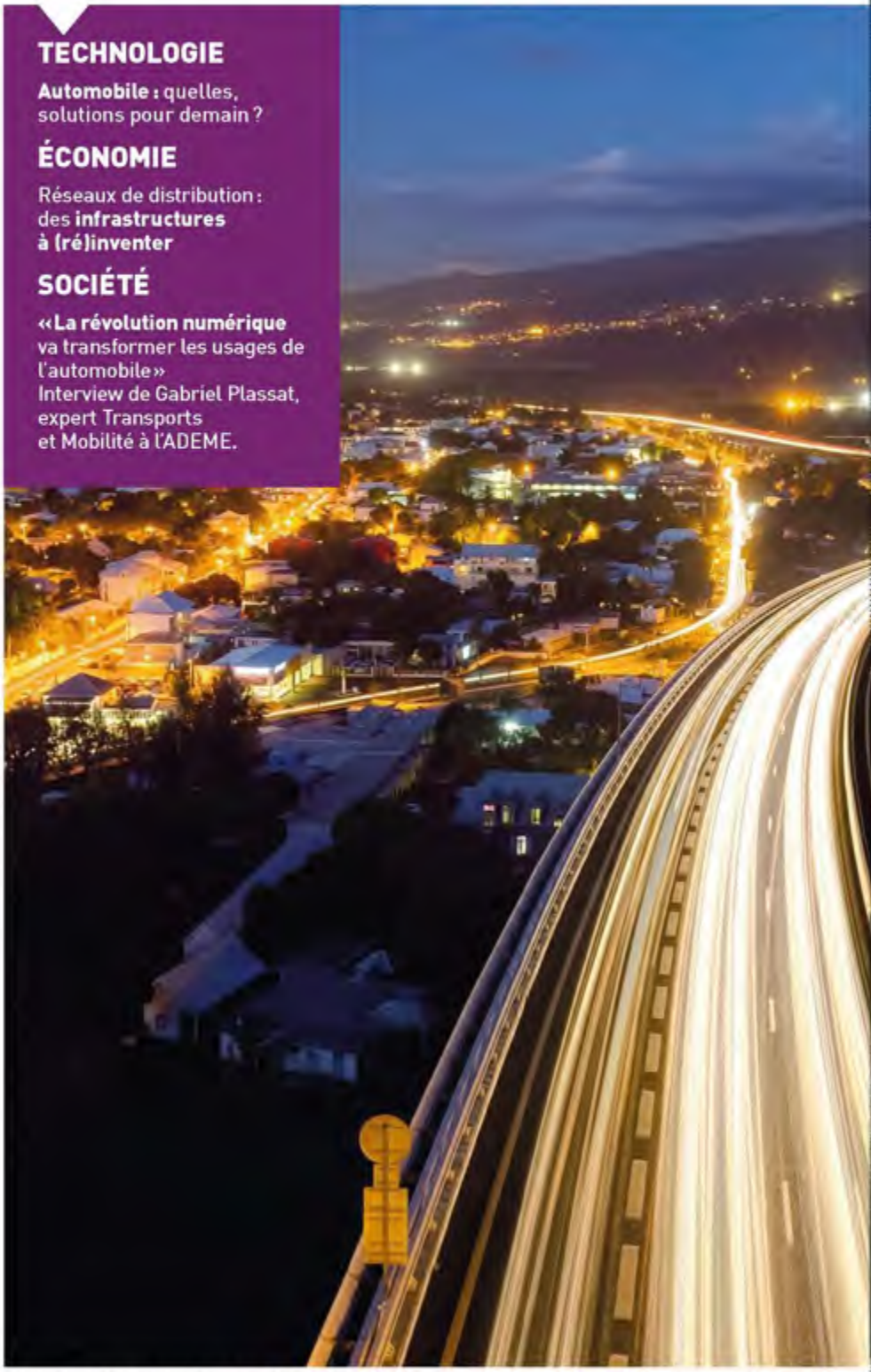
Automobile : quelles, solutions pour demain ?

ÉCONOMIE

Réseaux de distribution : des **infrastructures à (ré)inventer**

SOCIÉTÉ

« La révolution numérique va transformer les usages de l'automobile »
Interview de Gabriel Plassat, expert Transports et Mobilité à l'ADEME.



Tous les deux mois, ce cahier *La Recherche* vous permet de comprendre les défis technologiques, économiques et environnementaux des énergies.

Automobile : quelles solutions pour demain ?

Améliorer son rendement, réduire ses émissions, rester abordable sans perdre en sécurité… Face aux défis énergétiques et environnementaux du XXIe siècle, l'automobile doit résoudre une équation technologique plus complexe que jamais. Mais les éléments de réponse sont, pour l'essentiel, connus. Tour d'horizon.

Pour se rencontrer, pour échanger, pour commercer, il faut se déplacer : la mobilité est la condition première du développement de nos sociétés. La seconde moitié du XXe siècle a vu l'automobile s'imposer comme le premier vecteur de cette mobilité, grâce à l'extraordinaire association du pétrole et du moteur thermique – la circulation fluide, dans le monde entier, d'une énergie disponible et bon marché, et la capacité d'embarquer cette énergie pour transporter les biens et les personnes, avec une efficacité incomparable. Le parc automobile mondial a dépassé le milliard de véhicules en 2007, pour un réseau routier estimé à 69 millions de kilomètres. Alors que les taux d'équipement se stabilisent dans l'OCDE, en Amérique du Nord ou au Japon, l'industrie automobile poursuit sa croissance dans les économies émergentes. La Chine est depuis 2009 son premier marché mondial – et l'on n'y compte encore que 50 véhicules pour 1 000 habitants. Ce développement phénoménal de la mobilité a un coût. La voiture produit un tiers des émissions de CO_2 en Europe. Aux enjeux environnementaux s'ajoute le défi énergétique : le pétrole, encore abondant, va voir sa production plafonner et son prix ne peut que croître à l'avenir.

Depuis le protocole de Kyoto en 1995, constructeurs, équipementiers et groupes énergétiques produisent un énorme effort R & D pour rendre l'automobile plus sobre en énergie, moins émettrice de polluants et de gaz à effet de serre (GES), sous l'impulsion de réglementations toujours plus strictes. Dans l'Union européenne, la norme Euro 5 (Euro 6 en 2014) encadre les émissions de polluants locaux et, les politiques publiques ont fixé un objectif moyen de 130 g de CO_2 émis par kilomètre pour les véhicules neufs en 2012. Cet objectif sera ramené à 95 g en 2020, ce qui correspondrait à une consommation moyenne de 4,1 l/100 km pour les moteurs essence, et de 3,6 l/100 km pour un diesel. Dans cette course à l'efficacité, tous les leviers sont actionnés. Aérodynamique oblige, les voitures voient leurs formes s'arrondir : *« Une amélioration de 5 % du taux de pénétration dans l'air du véhicule peut se traduire par un gain de 0,5 à 1 litre aux cent »*, indique Philippe Girard, à la direction scientifique de Total. Le développement de matériaux innovants – polypropylènes et résines composites notamment – permet d'alléger les véhicules sans perdre en sécurité. L'amélioration continue des pneumatiques et les travaux de recherche sur le contact pneu-chaussée, les lubrifiants et graisses utilisés dans les ensembles mécaniques (moteur, boîte de vitesses, transmission, hydraulique, roulements…) réduisent les frottements et contribuent eux aussi à l'efficacité énergétique du véhicule.

Mais à l'heure du mix énergétique, c'est bien sûr la motorisation qui concentre les visées et les questions : comment roulerons-nous demain ? À quel prix et pour quel bilan environnemental ? *« Tout dépend des stratégies des acteurs industriels et des États, dont découlent les choix technologiques, le coût des énergies (pétrole, gaz, électricité, hydrogène…) et l'évolution couplée des infrastructures de distribution »*, répond Daniel Le Breton, directeur Développement Produits de Total *(voir page 101)*. *« Tout dépend d'abord de l'évolution de nos usages de l'automobile »*, affirme Gabriel Plassat, expert Transports et Mobilité à l'ADEME *(voir page 103)*.

L'hybridation, avenir de l'automobile ?

Le moteur thermique – 98 % des automobiles aujourd'hui – conserve une marge de progression importante, en particulier les moteurs à essence. *« Une*

CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS ROUTIERS EN 2009 (1)

ÉVOLUTION DES RÉGLEMENTATIONS EN MATIÈRE D'ÉMISSIONS DE CO_2 DES VÉHICULES PARTICULIERS

La réglementation sur les émissions de CO_2 est le moteur de l'effort R&D des constructeurs. Ci-contre, l'évolution des normes dans le monde depuis 2002, en grammes de CO_2 par kilomètre. Source : ICCT 2012.

réduction de 50 % des consommations unitaires par rapport à 2007 est raisonnablement possible à terme», estime en juin 2011 un rapport du Centre d'analyse stratégique. Le mode de combustion par injection directe est une piste solide pour rapprocher le moteur à essence des rendements obtenus avec le Diesel, mais elle nécessite un circuit haute pression et des injecteurs de précision, encore coûteux. Expérimenté depuis la fin des années 1990 par Mitsubishi ou Volkswagen, il intéresse de près la plupart des constructeurs. Autre tendance de fond : le *downsizing*, qui vise à abaisser la cylindrée des moteurs en maintenant une puissance égale, grâce à un rendement optimisé par la suralimentation. À la clé, un gain de place dans le véhicule et une consommation moindre. Exemple : «*Un moteur à essence de 2,5 l, capable de délivrer une puissance 123 kW et un couple de 211 N.m, peut être remplacé par un moteur de 2 l turbo. Celui-ci délivre 120 kW avec un couple de 250 N.m, donc des prestations équivalentes, tout en offrant une réduction de consommation de 9 %*», explique Renault.

Mais dans la course au rendement optimal, le moteur thermique pur souffre d'une limite structurelle : «*Un moteur qui affiche un rendement nominal de 35 % n'offre en réalité qu'un rendement de 15 à 30 %, du fait de la prédominance des régimes transitoires jusqu'à 90 km/h*», indique Philippe Girard. Pour éviter cet écueil, il faut faire fonctionner le moteur thermique, autant que possible, sur sa zone de rendement optimal, une motorisation électrique prenant le relais lors des redémarrages et changements de régime. C'est le principe de l'hybridation, lancée dès 1997 en grande série par Toyota avec la Prius et qui fait désormais l'objet de programmes R&D chez tous les grands constructeurs – de GM, en association avec Mercedes et BMW, à Ford ou encore PSA qui se positionne sur l'hybride Diesel-électrique. Déclinée à différents degrés, du simple «*stop'n start*» au «*full hybrid*» rechargeable *(voir encadré page 100)*, l'hybridation est considérée comme la carte maîtresse de l'automobile de demain par nombre d'acteurs industriels. Adaptée à tous les usages (de l'urbain à la route), elle ne nécessite pas d'évolution des infrastructures de distribution de l'énergie. Son handicap actuel reste le coût d'achat, pour un retour sur investissement lié à l'usage que l'on fait du véhicule.

Objectif zéro émission

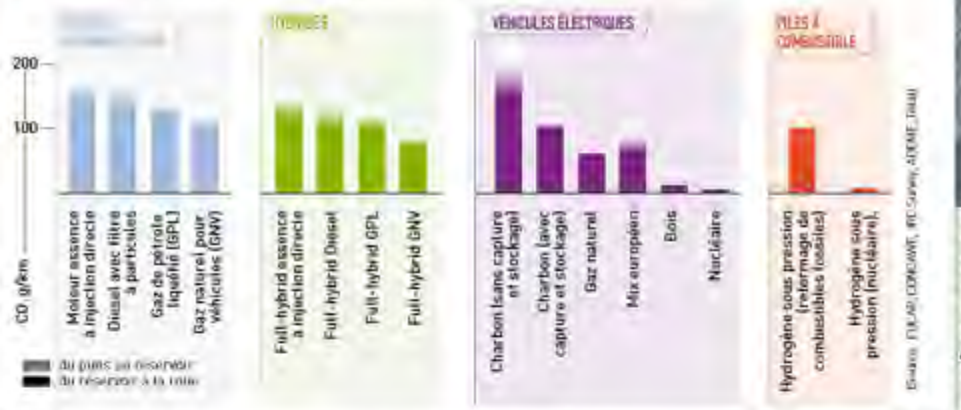
Reste que la meilleure façon de réduire ses émissions de CO_2, c'est encore… de ne pas en émettre du tout. C'est le choix que propose notamment Renault, qui se positionne comme un pionnier du 100 % électrique. «*Avec le développement du véhicule électrique, les émissions moyennes de la gamme Renault passeront sous la barre des 100 g au kilomètre dès 2016*», annonce le P-DG Carlos Ghosn lors du Salon de l'automobile 2012. L'alliance Renault Nissan, qui a investi 4 milliards d'euros dans cette technologie, se fixe l'objectif de vendre 1,5 million de véhicules 100 % électriques en 2016. Une ambition forte pour un marché encore confidentiel aujourd'hui, «*quelque 40 000 véhicules électriques vendus, principalement en Europe et Amérique du Nord, avec beaucoup de petits constructeurs*», estime Dominique Herrier de l'IFP-EN. Parmi les défis technologiques que doit relever la filière : l'autonomie des batteries, qui induit une contrainte évidente sur les usages. La berline citadine Renault Zoé annonce ainsi une autonomie normalisée de 210 km avec recharge complète, mais une autonomie en parcours périurbain de 100 à 150 km. Pour le véhicule électrique, comme d'ailleurs pour les hybrides, le stockage embarqué d'électricité s'est imposé comme un champ de recherche stratégique. Tous les espoirs se portent sur l'amélioration des batteries lithium-ion. «*Cette technologie mature est celle qui offre le meilleur rapport énergie-volume, avec des performances et une durée de vie compatibles avec l'usage automobile*», résume Jean-Louis Liska, responsable du développement des éléments Li-ion Saft. Pour un véhicule 100 % électrique, les batteries actuelles permettent d'embarquer une énergie de 20 à 30 kWh pour une masse de 200 à 300 kg, soit une énergie massique de l'ordre de 100 Wh par kilogramme de batterie (poids intégrant l'ensemble du bloc batterie).

Et demain ? «*À terme, l'amélioration des matériaux de l'anode et de la cathode pourrait permettre d'atteindre 150 à 200 Wh/kg*», indique Jean-Louis Liska. Soit une augmentation potentielle de 50 % à 100 % de l'autonomie des véhicules. Ce qui changerait la donne. Mais il faudra que, dans le même temps, les infrastructures de rechargement des véhicules se développent. Si la charge peut s'effectuer en 4 à 8 heures sur une prise électrique standard (16 A, 3 kW), le rechargement rapide (20 à 30 min pour la Zoé) nécessite des parcs de bornes spécifiques dont le déploiement à grande échelle pose d'autres problèmes *(voir page 101)*.

Histoires d'eau

L'autre grande option pour concevoir des véhicules 100 % électriques, c'est la pile à combustible, qui fait l'objet de recherches poussées depuis des années. Le principe : faire réagir, >>>

COMPARAISON SCHÉMATIQUE DES ÉMISSIONS DES CO_2 SELON LE TYPE DE VÉHICULE ET L'ORIGINE DE L'ÉNERGIE UTILISÉE



Seule l'analyse «du puits à la roue», intégrant la production et le transport des carburants, permet d'évaluer la véritable empreinte environnementale d'un véhicule. Ci-dessus, données indicatives pour différentes filières en 2010.

LA VOITURE, PILIER DE LA MOBILITÉ INDIVIDUELLE

À pied ou à vélo, en voiture ou en bus, en train ou en avion ? Le «mix transport», comme le mix énergétique, gagne à être diversifié pour s'adapter à une demande croissante de mobilité. À l'échelle mondiale, la marche est le mode le plus utilisé (36 % des déplacements individuels en distance). La voiture est le premier mode motorisé (22 %), devant les transports en commun (20 %) et les deux-roues (chiffres IFP-EN). Ce cahier «Chercheurs d'énergies» est centré sur la mobilité automobile, qui reste le grand défi énergétique de la mobilité individuelle.

Les batteries lithium-ion offrent les meilleures performances pour les motorisations hybrides ou 100% électriques. Ci-dessous : Module Saft Li-ion 48 V pour voiture de type hybride «abordable», présenté par Saft au Mondial de l'automobile 2012.

>>> par oxydoréduction, de l'hydrogène embarqué dans un réservoir avec l'oxygène de l'air, ce qui produit de l'électricité et de l'eau. Plus de problèmes de gestion de la batterie : le «plein» se fait en quelques minutes, pour une autonomie de l'ordre de 400 km actuellement. En Allemagne, les pouvoirs publics supervisent depuis dix ans l'initiative Clean Energy Partnership, qui réunit constructeurs, gaziers et groupes énergétiques autour d'un parc expérimental de stations. Toyota et Daimler annoncent des véhicules de grande série pour 2020. Mais les défis restent nombreux. Le prix des véhicules, même subventionnés, reste élevé. La distribution et le stockage du combustible sous pression posent aussi des problèmes de sécurité. Enfin, tout le bilan écologique dépend de la provenance de l'hydrogène. Celui-ci est aujourd'hui obtenu à 95% par reformage de combustibles fossiles : son faible coût de production (2€/kg) s'accompagne de l'émission de 12 kg de CO_2. Pour produire de l'hydrogène propre, une solution prometteuse est l'électrolyse haute température de l'eau, à partir d'une électricité elle-même décarbonnée. Le CEA annonce un coût de production potentiellement inférieur à 3€/kg – auquel il faut ajouter les coûts logistiques et les taxes.

La remarque vaut bien sûr pour chaque filière : seule l'analyse «du puits à la roue», intégrant la production et le transport des carburants, permet d'évaluer la véritable empreinte environnementale d'un véhicule *(voir schéma p. 99)*. Ainsi une voiture électrique utilisant de l'électricité produite par une centrale au charbon peut-elle émettre davantage de CO_2 qu'un véhicule thermique classique. Quant aux biocarburants liquides, renouvelables et compatibles avec les réseaux de distribution conventionnels, leur développement reste conditionné par la disponibilité des surfaces. Ainsi l'essor des agrocarburants de première génération s'est souvent effectué au détriment de surfaces forestières ou de l'agriculture vivrière – ce qui n'est pas le cas par exemple du biométhane carburant, lequel peut être obtenu à partir des déchets organiques urbains.

L'équation énergétique et environnementale de la mobilité reste extraordinairement complexe. Dans une étude parue en 2012, le cabinet Frost & Sullivan estime à 110 millions le nombre de véhicules particuliers vendus dans le monde en 2020. Parmi ceux-là, 2 à 3% d'électriques purs et 97 à 98% de motorisations thermiques plus ou moins hybridées, dont 9 à 11% utilisant des carburants alternatifs (gaz naturel, GPL, mélanges à fortes teneur en biocarburants). L'histoire de l'automobile continue. ●

Vous avez dit «hybridation» ?

Tous les acteurs s'accordent à le dire : le véhicule hybride – thermique et électrique – sera une composante majeure de l'automobile de demain. Mais la notion désigne des motorisations très différentes. On peut distinguer trois grands niveaux d'hybridation :

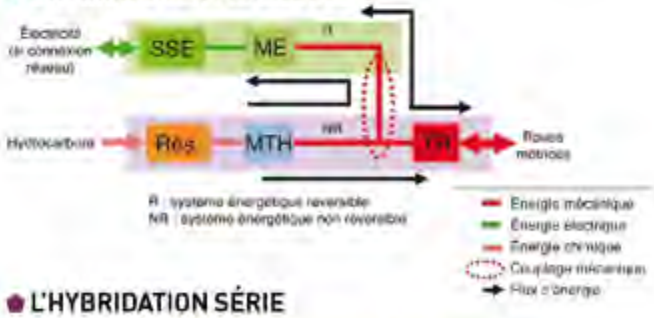
● Les véhicules *micro-hybrids* sont dotés du système *stop & start* (par exemple arrêt et redémarrage automatique au feu rouge). Certains sont aussi équipés de dispositifs pour récupérer de l'énergie au freinage et/ou épauler le moteur thermique lors des accélérations – on parle alors de *micro-mild-hybrids*.

● Les véhicules *mild-hybrids* reprennent ces éléments et disposent de plus d'une capacité de propulsion électrique limitée : elle peut fonctionner aux vitesses inférieures à 50 km/h, avec une autonomie de l'ordre d'1 km. Le moteur électrique peut délivrer une puissance de 8 à 15 kW.

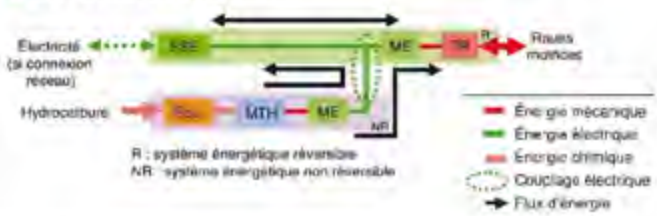
● Les véhicules *full-hybrids* sont dotés d'une propulsion électrique pure, d'une autonomie pouvant aller de quelques kilomètres jusqu'à 50 km dans le cas des systèmes hybrides rechargeables, ou *plug-in hybrids*. Le moteur électrique peut atteindre une puissance de 20 à 40 kW ou plus. Les moteurs thermiques et électriques peuvent être associés en architecture série ou en parallèle. Dans le premier cas, le moteur thermique ne sert qu'à produire du courant : la propulsion est électrique, mais l'efficacité dépend du rendement cumulé des deux systèmes. Dans le second cas (hybride parallèle), les roues motrices sont «attaquées», selon les situations, par le moteur thermique ou par l'électrique – ou par les deux en même temps. Le rendement est globalement supérieur, mais l'ensemble nécessite une électronique poussée. Enfin, certains véhicules *full-hybrid*, à l'image de la Toyota Prius, intègrent une motorisation «parallèle-série» qui combine les deux architectures précédentes. Un rendement encore optimisé, au moyen d'un système complexe et d'une masse accrue.

De manière générale, le prix du véhicule augmente (par rapport à la motorisation thermique seule) avec le degré d'hybridation : le surcoût varie de 100 € pour un simple *stop & start*, à plus de 10 000 € pour les hybridations les plus poussées.

● **L'HYBRIDATION PARALLÈLE**



● **L'HYBRIDATION SÉRIE**



Sources : EIA, Energy Institute

Réseaux de distribution : des **infrastructures à (ré)inventer**

Carburants alternatifs, hydrogène, voiture électrique… la diversification des sources d'énergie pour l'automobile nécessite des adaptations plus ou moins profondes des réseaux de distribution. Les modèles économiques restent à construire. Quelques repères.

De gauche à droite : un volucompteur à Chaoula (Maroc) ; inauguration d'une borne de recharge rapide sur le parking d'un supermarché à Hagueneau (Bas-Rhin).

« C'*est le problème de la poule et de l'œuf !* » : l'expression revient souvent lorsque l'on évoque les évolutions des infrastructures de distribution d'énergie qu'implique l'arrivée de nouvelles motorisations sur le marché. Sans un réseau de stations suffisant, difficile d'assurer une liberté de circulation – et donc d'inciter les particuliers à l'achat. Mais sans véritable parc en circulation, comment financer le développement et l'alimentation des nouveaux réseaux ? « *Dans le domaine des transports, les évolutions se font toujours de manière très incrémentale* », analyse Dominique Herrier, directeur adjoint du centre de résultats Transports IFP-EN. Le poids de l'existant est énorme : à l'échelle mondiale, l'ensemble des équipements de distribution actuels représente un investissement cumulé estimé à 6 000 milliards de dollars. D'une filière à l'autre, les problématiques sont très différentes. Ainsi le développement des biocarburants liquides, souvent tiré par les politiques publiques, ne pose que peu de problèmes au plan des infrastructures. « *Ils sont pour la plupart fongibles dans d'autres carburants et se gèrent à travers les réseaux conventionnels* », résume Daniel Le Breton, directeur Développement Produits de Total. À l'inverse, le véhicule 100 % électrique nécessite le déploiement d'infrastructures complètement nouvelles. Les bornes de recharge rapide actuelles, d'une puissance de 42 kW (contre 20 MW disponibles au pistolet d'une pompe à essence) demandent de lourdes adaptations du réseau de transport d'électricité. « *Le coût d'installation d'une seule borne en station-service est compris entre 50 000 et 65 000 euros,* calcule Daniel Le Breton. *Et sur une station d'autoroute, c'est deux ou trois fois plus.* » Autre difficulté, le temps de charge – 30 minutes minimum en charge rapide – nécessite une surface au sol bien plus importante pour assurer la rotation des véhicules.

Les laboratoires du 100 % électrique

Face à ces défis, les constructeurs doivent procéder par étapes, en commençant par déployer les réseaux de charges sur des parcs spécifiques : flottes captives, réseaux urbains type Autolib, parkings d'entreprise ou de collectivités. Ainsi Renault a décidé d'équiper ses sites français de bornes de recharge rapide. « *Cette expérience nous permet de mener une réflexion globale pour préparer ces infrastructures à tous les niveaux,* explique Philippe Davin, directeur Transports chez Vinci Énergies Île-de-France, qui assure le déploiement pour Renault, *depuis les ateliers techniques consacrés à la normalisation des prises ou à la sécurité des utilisateurs, jusqu'à la conception de "smart grids", réseaux d'énergie intelligents qui permettent d'optimiser les flux électriques à l'échelle d'un site industriel.* » De quoi envisager une extension aux parkings opérés par Vinci ? « *Il faudra faire évoluer les contrats avec les collectivités* », répond Philippe Davin. Autre expérimentation en >>>

>>> cours : La Poste, qui devrait déployer d'ici à 2015 plus de 10 000 véhicules électriques, a lancé avec ERdF le projet Infini Drive, visant à la mise au point d'un modèle standard pour les flottes d'entreprise. L'initiative est soutenue par la puissance publique, via l'ADEME, à hauteur de 3,5 millions d'euros, dans le cadre des Investissements d'avenir. Enfin, les grandes surfaces pourraient constituer un partenaire précieux par le déploiement des bornes de recharge sur leurs parkings. Nissan, qui a offert 400 bornes de sa conception à des enseignes européennes de grande distribution, tablerait sur un réseau de dizaines de milliers d'équipements en Europe à l'horizon 2015.

Outre les bornes de recharge rapide et le rechargement standard (8 à 10 heures sur une prise domestique), une troisième solution est à l'étude pour étendre les usages du véhicule électrique au-delà du trajet domicile-travail : le changement de batterie « minute ». C'est l'objectif de la société californienne Better Place. Celle-ci œuvre, en partenariat avec Renault, au déploiement d'un premier réseau d'échange opérationnel en Israël. Better Place a également inauguré début septembre une station dédiée à la flotte de taxis de l'aéroport d'Amsterdam, et développe des projets au Danemark ou aux Pays-Bas. Si la promesse apparaît séduisante, notamment pour des pays peu étendus, la technologie doit encore lever des difficultés importantes – entre autres, la gestion de stocks de différents types de batteries – pour convaincre les pouvoirs publics de la viabilité économique de son modèle à grande échelle.

Hydrogène : la route est encore longue

En comparaison, la voiture à hydrogène apparaît davantage « soluble » dans les modèles existants, tant au plan des réseaux de distribution que des usages : une autonomie plus importante (400 km aujourd'hui), pas de limite de puissance motrice, un carburant stockable et un plein fait en quelques minutes. Mais là encore, le modèle économique est loin d'être stabilisé. Le coût du véhicule reste élevé (plus que pour un équivalent électrique rechargeable), tout comme celui du combustible lui-même et des infrastructures qu'il exige. *« Une simple station à hydrogène représente un investissement d'un million d'euros, soit autant qu'une station multipistes d'autoroute »*, indique Daniel Le Breton. La filière est cependant étudiée de près par Total, qui a inauguré sa première station opérationnelle à Berlin en 2012. Le pétrolier est membre depuis dix ans du groupement Clean Energy Partnership aux côtés notamment de Mercedes, Toyota, Hyundai, Honda, Air Liquide, Linde, Shell ou Siemens. Objectif : étudier des scénarios de montée en régime de la filière, au travers d'un parc expérimental qui compte aujourd'hui cinq stations en Allemagne, et devrait s'étendre jusqu'à un réseau embryonnaire d'une cinquantaine de points en 2016. Pour faire le plein, l'option de l'hydrogène liquide, portée un temps par BMW, a été abandonnée. Les véhicules sont alimentés par de l'hydrogène sous pression (350 ou 700 bars), maintenu à -40 °C. Comme toujours avec les gaz, le transport est lui aussi coûteux. Au final, le combustible est vendu autour de 9,5 €/kg à la pompe – *« sans accises, avec une TVA à 20 % »*, précise Daniel Le Breton. Ce qui équivaut (à puissance égale) à une essence à 2,5 euros le litre. À terme, les évolutions technologiques mais surtout les incitations réglementaires laissent tout de même entrevoir la possibilité de descendre à 5 €/kg pour l'utilisateur, toujours hors accises. L'avenir n'est pas écrit. La décision politique est un moteur puissant pour impulser ces évolutions, mais pas toujours suffisant pour les inscrire dans les usages. Exemple ? Dominant en Argentine ou au Pakistan, le gaz naturel est aussi très utilisé en Italie, où existe à fin 2011 un parc de 779 000 véhicules GNV (Gaz naturel pour véhicules) pour 858 stations (chiffres NVGA Europe). En Allemagne, où ce carburant a été défiscalisé pendant vingt ans, le réseau compte davantage de stations (plus de 900)… pour beaucoup moins de véhicules GNV en circulation (96 000). En France, la filière, insuffisamment poussée, n'a jamais démarré pour les usages particuliers. Quant au GPL (Gaz de pétrole liquéfié), économique et mieux implanté – 1 750 stations dans l'Hexagone – il peine toujours à trouver sa clientèle. ●

De haut en bas : site de stockage de GPL à Nairobi, Kenya ; un automobiliste fait le plein d'hydrogène dans la station Total de Berlin.

« La révolution numérique va transformer les usages de l'automobile »

Gagner en efficacité énergétique, c'est aussi repenser notre rapport à l'objet automobile, pour en développer des usages plus intelligents. Entretien avec Gabriel Plassat, expert Transports et Mobilité à l'ADEME.

Gabriel Plassat a débuté sa carrière dans la construction automobile : ingénieur Architecture Moteur chez Peugeot Citroën. En 2001, il rejoint l'ADEME au poste d'ingénieur Énergies et Prospectives dans le service Transports et Mobilité. Il y développe des approches systémiques de la mobilité à l'ère numérique.

Pourquoi devrions-nous, comme le prône l'ADEME, changer de rapport à l'automobile ?
La première raison, c'est évidemment la nécessité de consommer moins d'énergies fossiles, d'émettre moins de gaz à effet de serre (GES). L'objectif du « facteur 4 », validé en France par le Grenelle de l'environnement, vise à réduire de 75 % les émissions globales des pays développés à l'horizon 2050 pour éviter des dégradations irrémédiables du système climatique. Dans le secteur automobile, l'effort technologique que mènent en ce sens les acteurs industriels est nécessaire mais pas suffisant : il doit s'accompagner d'une mutation profonde des usages de la voiture. En France, le nombre de passagers moyen dans une voiture est aujourd'hui de 1,2. Si nous parvenions à une moyenne de deux personnes par véhicule, cela équivaudrait, pour un même flux transporté, à quarante années de progrès technologique en termes de réduction des GES ! Nous n'avons plus le temps de négliger ce gisement. D'autre part, la voiture individuelle est moins adaptée qu'hier à nos besoins en mobilité, notamment en zone urbaine. Depuis un siècle, les constructeurs ont produit un objet exceptionnel, qui s'est imposé comme le mode de transport dominant. La voiture, censée répondre à tous nos besoins de déplacement, s'est améliorée sans cesse en oubliant de s'intéresser aux évolutions des usages.

Les attentes changent-elles ?
Avec l'extension des grandes agglomérations, la mobilité devient plus complexe, plus multimodale. Les transports en commun font l'objet de gros investissements, le vélo trouve un nouveau souffle. La voiture n'est qu'une option, avec ses avantages et ses inconvénients – pollution, coût, congestion. Il y a une vraie prise de conscience dans les opinions, qui se traduit depuis plusieurs années par des réalisations significatives : l'essor du covoiturage, les plates-formes d'autopartage, le succès du Vélib' – mauvais objet à mon sens, mais offrant un service performant. À New Delhi, le gouvernement développe avec Mega Carpool une flotte de véhicules particuliers optimisée par un système GPS. La Chine va expérimenter des véhicules électriques en libre-service – voitures basiques et modèles d'affaires. General Electrics va acheter 25 000 véhicules électriques pour apprendre à les opérer, en vue de devenir fournisseur de mobilité. Ce sont des signes d'un glissement de fond, de l'automobile patrimoine à l'automobile service.

Pour l'ADEME, la généralisation de l'Internet mobile sera le moteur de cette évolution…
C'est ce qui la rend possible. Le numérique permet d'accéder, comme jamais auparavant, à la connaissance des usages. Une société comme Amazon connaît ses clients d'une manière inédite. Dans le champ de la mobilité, des acteurs puissants s'emparent de ces sujets. IBM développe des systèmes de prédiction de trafic à une heure. Apple investit dans les applications cartographiques. Avec Street View, Google est en train d'annexer le monde réel. En Californie, la compagnie prépare très sérieusement la mise en service de *cybercars* sans pilote, opérés par un système central via le GPS. L'ADEME, qui appuie la création en France d'une filière industrielle « véhicules serviciels », s'emploie à favoriser cette évolution.

Quels sont les freins aujourd'hui ?
Les comportements sont prêts à évoluer mais nous manquons d'imaginaires collectifs pour la mobilité du futur. L'acceptabilité est la clé : il faut que les personnes comprennent l'intérêt pour eux et pour le collectif. Au plan économique, la décision politique doit accompagner la transformation des modèles d'affaires. Quant aux constructeurs, leur intérêt est de l'anticiper – ils commencent à le faire d'ailleurs, avec des services comme Twizyway chez Renault, Mu by Peugeot ou Citroën Multicity.

À quoi roulera la voiture de demain ? Pétrole, gaz, biocarburants, électricité, hydrogène ?
Il n'y a pas de solution évidente. Le plus probable, c'est un mix entre quelques filières gagnantes pour des usages donnés. Mais je préfère me demander combien nous serons à l'intérieur ! ●

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENT BASILICO

Ce cahier spécial La Recherche a été réalisé avec le soutien de la direction scientifique de TOTAL

Comité éditorial : Jean-François Minster, Total - Olivier Appert, IFP Énergies nouvelles - François Moisan, Ademe - Bernard Saiha, EDF - Bernard Tardieu, Académie des technologies - Marc Florette, GDF SUEZ - Jean-Michel Ghidaglia, *La Recherche*
Rédaction : Laurent Basilico
Conception graphique et réalisation : A noir,
Crédits photographiques : Frog 974/Fotolia.com, SAFT, Marco Dufour/Total, Vinci Énergies, Philippe Scheff/Total, Bernard Blaise, DR

Retrouvez ce cahier spécial en français et en anglais sur le site
planete-energies.com
une initiative de TOTAL

Naître aujourd'hui

A suivre EN 2013

L'année 2013 devrait provoquer l'effervescence dans bien des domaines scientifiques. Effervescence en astrophysique : au premier trimestre, la collaboration internationale Planck livrera la très attendue cartographie du fond diffus cosmologique, premier rayonnement émis par l'Univers, 380 000 ans seulement après le Big Bang. Effervescence chez les climatologues : ils remettront la partie sans doute la plus attendue du cinquième rapport sur le changement climatique. Nourrie par des simulations plus précises, celle-ci contiendra notamment les prévisions en matière de hausse des températures à venir.

Une description plus précise du changement climatique p. 106

Les effets du baclofène sur l'alcoolisme p. 108

La cartographie de l'Univers très jeune p. 110

Et aussi... p. 112

Cinquième édition de la «bible» des psychiatres • Le suivi satellite de 800 000 poids lourds • Un rapport européen sur les perturbateurs endocriniens • Premier essai clinique pour les cellules iPS • Une rue artificielle en laboratoire • Le vécu des donneurs de rein • Des déchets miniers contre le cancer • Un réseau de satellites pour surveiller la Terre • Le lac Léman scruté par des ULMs • Le «repas» d'un trou noir • Un accélérateur de particules à Caen • Mieux récupérer ses souvenirs

«Je veux une recherche apaisée et moins bureaucratique»

Entretien avec Geneviève Fioraso p. 118

© ILLUSTRATION RÉMI MALINGREY

Une description plus précise du changement climatique

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat de l'Organisation des Nations unies livrera à l'automne la partie la plus attendue de son cinquième rapport sur le réchauffement climatique.

Tandis que les négociations politiques sur le climat piétinent et que les émissions de gaz à effet de serre augmentent, la science avance. À l'automne 2013, le Groupe d'experts sur le climat de l'ONU (GIEC) livrera la première partie de son cinquième rapport sur le réchauffement climatique. Un document en quatre volets publiés sur une période d'un an, qui vise à comprendre le climat, prévoir son évolution et décrire ses conséquences sur la planète et ses habitants (lire « Un calendrier en quatre étapes », ci-contre).

La première partie, issue des travaux du groupe I du GIEC, doit être adoptée en assemblée plénière, à Stockholm du 23 au 26 septembre 2013. C'est probablement la plus attendue du rapport : ce traité de climatologie, fruit des efforts de centaines de spécialistes décrira l'état des connaissances sur le climat à partir des milliers de travaux publiés jusqu'au 15 mars 2013.

Modèles enrichis. Il contiendra des projections de l'évolution du climat pour ce siècle à partir des résultats d'une soixantaine de modèles de simulation et leurs déclinaisons, qui reposent sur quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

Plusieurs évolutions notables sont attendues. Six ans seulement se sont écoulés depuis le quatrième rapport, publié en 2007. Mais les connaissances sur le climat ont beaucoup progressé. De fait, de nombreux mécanismes physiques sont mieux décrits, notamment grâce aux succès des programmes d'observation de la Terre (bouées océaniques, satellites, etc.). Cela a permis d'enrichir les modèles que les climatologues élaborent pour reproduire l'évolution du climat depuis le XIX[e] siècle, passage obligé avant toute projection pour l'avenir.

Ainsi, la plupart des modèles de simulation climatique prennent désormais en compte le rôle de la végétation dans le cycle du carbone, ce qui était encore rare il y a

© MARIE VICOMTE/CNRS PHOTOTHÈQUE

Ce ballon, lancé à Sao Paulo au Brésil, est équipé d'un spectromètre laser infrarouge. Objectif : quantifier et comprendre les échanges d'eau entre les différentes couches de l'atmosphère en zone tropicale. Ce type de mesure permet d'affiner les modèles climatiques.

six ans. De la même manière, les mécanismes de formation et de disparition de la banquise sont bien mieux dépeints qu'ils ne l'étaient auparavant. La description des nuages et la chimie atmosphérique ont été affinées, et les simulations tiennent compte d'une large palette d'aérosols – les particules qui jouent un rôle clé vis-à-vis du rayonnement solaire. Enfin, grâce aux progrès informatiques, la précision géographique des modèles a été doublée.

L'autre évolution essentielle par rapport à 2007 est un changement en profondeur de la manière dont l'évolution des rejets de gaz à effet de serre est prise en compte par le GIEC. Jusqu'à présent, les climatologues s'appuyaient sur les projections des économistes, des démographes et des spécialistes de l'énergie. Un mode opératoire laborieux qui, de plus, était critiqué en raison de l'aléa des projections socio-économiques sur un siècle.

Agir ou laisser-faire. Désormais, les climatologues se sont mis d'accord sur quatre scénarios fictifs d'émissions de gaz à effet de serre, le premier correspond à une action très radicale des États, sans doute illusoire, contre le réchauffement, tandis que le dernier prolonge le laisser-faire constaté ces dernières années. Ces quatre « trajectoires » débouchent sur quatre valeurs du « moteur » du réchauffement climatique : le forçage radiatif, paramètre qui mesure le déséquilibre énergétique de l'atmosphère au niveau de la frontière entre la troposphère et la stratosphère. Pour 2100, on le considère alors compris entre 2,6 watts par mètre carré et 8,5 watts par mètre carré. Grâce à ce mode opératoire, le rapport du groupe I du GIEC proposera une fourchette de changement de température d'ici la fin du siècle, et même – pour la première fois – au cours des deux siècles suivants.

En attendant les projections officielles du GIEC, des premiers résultats permettent de se faire une idée de l'ampleur du réchauffement attendu, à l'image des premières simulations rendues publiques il y a un an par Météo France, et l'institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL) – les deux groupes de modélisation français impliqués dans le programme mondial de simulation CMIP-5. Pas de changement par rapport à 2007 : tous deux confirment, s'il en était encore besoin, que seule la prise en compte des gaz à effet de serre et des aérosols permet d'expliquer l'évolution du climat depuis un siècle, et en particulier depuis les années 1980. Ils prévoient une évolution de température moyenne du globe analogue à celle projetée par le GIEC en 2007, à savoir une hausse de 2,3 °C à 4,5 °C entre 1850 et 2100. Les deux modèles français indiquent une hausse des températures comprise entre 2 °C et 5 °C, qui, dans le pire des cas, se prolongerait par une surchauffe supplémentaire de 6 °C à 7 °C entre 2100 et 2300.

En matière de précipitations, pas de changement significatif non plus par rapport à 2007 : les deux modèles français prévoient une augmentation des pluies aux latitudes équatoriales, notamment dans le Pacifique, et une baisse aux latitudes subtropicales, par exemple sur le bassin Méditerranéen. « *Cette stabilité dans les projections montre la robustesse de nos estimations*, souligne Jean-Louis Dufresne, qui dirige l'équipe de modélisation globale et changements climatiques du laboratoire de météorologie dynamique, au sein de l'IPSL. *Mais il est vrai que si l'on pouvait penser il y a quelques années qu'il y aurait des limitations dans les ressources en hydrocarbures, et donc dans les émissions de gaz à effet de serre, cela semble moins le cas aujourd'hui avec le recours grandissant aux gaz et pétroles de schistes.* » ■ **Denis Delbecq**

UN CALENDRIER EN QUATRE ÉTAPES

Le cinquième rapport du GIEC sera formé de trois documents en anglais, suivis d'une synthèse en plusieurs langues, destinée aux décideurs politiques.

- **Septembre 2013 : le rapport du groupe I dressera l'état des connaissances sur le climat et présentera les projections de l'évolution climatique pour l'avenir.**
- **Mi-mars 2014 : le rapport du groupe II, évaluera l'impact, la vulnérabilité et l'adaptation nécessaire au changement climatique.**
- **Début avril 2014 : le rapport du groupe III décrira les moyens de freiner le réchauffement climatique. Un rapport spécial, sur les énergies renouvelables, a été publié en mai 2011.**
- **Octobre 2014 : parution du document de synthèse.**

© PATRICK DUMAS/LOOKATSCIENCES

Ce supercalculateur de Météo France a été utilisé pour simuler l'évolution du climat. Sa puissance de calcul permet de mieux comprendre l'impact des phénomènes atmosphériques et océaniques sur le changement climatique.

L'essentiel

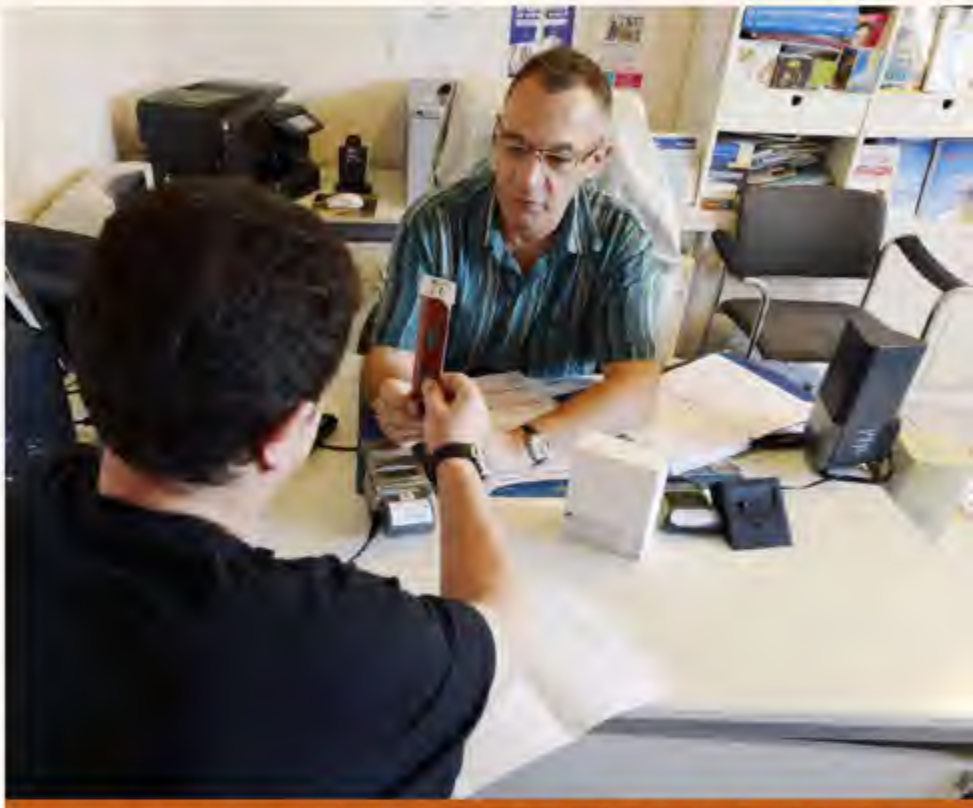
- **LE GIEC va publier un cinquième rapport sur le changement climatique, six ans après la dernière édition.**
- **LES PREMIÈRES SIMULATIONS rendues publiques montrent une hausse des températures de 2 °C à 5 °C d'ici à 2100.**
- **LES PROJECTIONS reposent sur des hypothèses physiques, et non plus sur des simulations socio-économiques.**

Pour en savoir plus

- **www.ipcc.ch** Le site du GIEC.

Les effets du baclofène

Deux essais cliniques vont évaluer les effets sur la dépendance à l'alcool du baclofène, médicament destiné au départ à soulager les contractures musculaires.



Dans son cabinet, un médecin généraliste présente l'étude Bacloville à un patient souffrant d'addiction à l'alcool. Ce dernier devra notamment évaluer lui-même sa consommation d'alcool mensuelle.

Fin septembre 2012, les pharmacies françaises ont été durant quelques jours en rupture de stock de baclofène, médicament destiné à soulager les contractures musculaires. Le succès de ce produit ne tient pas à son effet sur les muscles mais à sa capacité – inégalée, dit-on – à sortir son utilisateur de la dépendance à l'alcool. Un problème qui concernerait près de 6 millions de personnes en France. Seulement voilà, dans ce cas de figure, le baclofène – et les doses qui vont avec – est pris de façon empirique : aucun essai clinique de grande ampleur en double aveugle* n'a testé sur l'homme l'effet de cette substance sur la dépendance à l'alcool. Ce sera chose faite, cette année, avec deux études, l'une en ville, l'autre en milieu hospitalier.

L'essentiel

> LA CONSOMMATION de baclofène explose depuis qu'un cardiologue a utilisé empiriquement ce médicament pour sortir de l'alcoolisme.

> DEUX ESSAIS CLINIQUES vont évaluer son efficacité sur différents types de patient.

> LES RÉSULTATS sont attendus pour le milieu de l'année 2014.

Automédication. Les effets du baclofène sur l'addiction sont connus depuis 1996, lorsqu'une équipe italienne l'a testé sur des rats, et a réussi à les guérir d'une dépendance à la cocaïne et à l'alcool. Cette étude et les suivantes ont donné l'idée au cardiologue Olivier Ameisen d'utiliser ce médicament générique peu coûteux pour guérir, avec succès, sa propre dépendance à l'alcool. Il s'est ainsi administré jusqu'à 270 milligrammes de baclofène par jour, soit plus de dix fois la posologie normale (de 20 à 30 milligrammes), avant de relater son expérience dans un livre très médiatisé, *Le Dernier Verre*, paru en 2008 [1].

Pressés par leurs patients dépendants à l'alcool, de plus en plus de médecins ont depuis prescrit du baclofène à forte dose. Portée par la réputation d'être bien plus efficace que les quelques molécules anti-addiction présentes sur le marché, la consommation de ce médicament a explosé. Selon la société Celtipharm, les ventes de baclofène auraient ainsi augmenté de 30,7 % de septembre 2011 à septembre 2012.

Toutefois, les prescriptions pour cette affection se font en dehors de l'autorisa-

***DANS UN ESSAI EN DOUBLE AVEUGLE** ni le médecin conduisant l'étude sur un médicament ni le patient ne savent s'il s'agit d'une substance active ou d'un placebo.

*** L'AUTORISATION DE MISE SUR LE MARCHÉ** est délivrée par une autorité de santé compétente sur la base d'essais cliniques de grande ampleur, qui permet à un médicament d'être commercialisé pour une indication et une posologie données.

sur l'alcoolisme

tion de mise sur le marché* (AMM) du médicament, ce qui est légal mais risqué pour le médecin en cas d'accident. Concrètement, aucun essai clinique n'a comparé l'efficacité du baclofène sur l'alcoolisme à celle d'un placebo, sur un grand nombre de patients, pas plus qu'il n'existe d'essai rigoureux pour en déterminer la dose. D'où l'intérêt des deux essais lancés aujourd'hui. Des essais qui diffèrent beaucoup par leur philosophie et par les patients concernés. Et il semble que, pour cette raison, un certain froid règne entre les deux promoteurs de ces études.

Essai en double aveugle. Le premier est Philippe Jaury, professeur de médecine à l'université Paris-Descartes et addictologue. En 2011, il a mené avec son équipe une étude sur 132 patients qui ont tous reçu du baclofène à dose variable. Au bout d'un an, 80 % des patients sont devenus abstinents ou sont revenus à une consommation modérée d'alcool [2].

C'est pourquoi il lance aujourd'hui un essai clinique de grande ampleur. Son nom : Bacloville, car il se déroule en ambulatoire. Financé par l'assurance-maladie et un donateur anonyme, il consistera à comparer l'effet du baclofène à celui d'une substance dépourvue d'effet thérapeutique, un placebo, l'un et l'autre étant donné pendant un an à un groupe de patients comparable, selon un protocole en double aveugle.

Objectif premier de Bacloville : savoir si au bout d'un an, les patients parviennent à une consommation modérée d'alcool telle qu'elle est définie par l'Organisation mondiale de la santé – soit 20 grammes d'alcool par jour pour les femmes et 30 pour les hommes, l'équivalent de deux verres de vin. *« Notre but n'est pas de viser l'abstinence, même si elle peut se produire. Notre expérience de la prise en charge des personnes alcoolo-dépendantes montre en effet que certains vivent très mal le fait d'être abstinent »*, explique Philippe Jaury.

Objectif secondaire : trouver la dose optimale efficace. Aujourd'hui, elle serait comprise selon les patients entre 30 et 400 milligrammes par jour, avec une moyenne autour de 130 milligrammes. L'étude observera aussi les effets secondaires du produit (somnolence, perte d'équilibre, confusion mentale...), encore mal documentés.

Consommation modérée. Les patients qui participeront à cet essai ne seront pas sevrés. Et certains ne consommeront pas d'alcool de façon chronique. *« Certains patients incapables de contrôler leur consommation, mais ne présentent pas ou pas encore de dépendance*, explique Philippe Jaury. *On s'en préoccupe peu en France. Pourtant, ils seraient 3 à 4 millions. »* Cet essai tentera de voir si le baclofène peut les aider à retrouver une consommation ponctuelle modérée.

Le deuxième essai est piloté par Michel Reynaud, qui dirige le centre des addictions de l'hôpital Paul-Brousse, à Villejuif. Financée par le laboratoire pharmaceutique français Ethypharm, « Alpadir » est un essai en double aveugle sur six mois qui portera sur 316 patients. *« Cette durée suffit pour voir empiriquement des effets, et correspond aux préconisations de l'Agence nationale de sécurité du médicament pour les essais de produits liés à l'alcool »*, explique Michel Reynaud.

Point majeur de divergence avec Bacloville : les patients d'Alpadir seront tous dépendants et sevrés au préalable. *« L'objectif premier est de maintenir l'abstinence »*, souligne Michel Reynaud. L'inclusion des volontaires a débuté en novembre 2012 et se poursuivra tout au long de 2013, pour une publication des résultats, comme Bacloville, autour de la mi-2014.

« Si l'étude est concluante, nous déposerons une autorisation de mise sur le marché pour le baclofène avec l'indication de l'alcoolo-dépendance et du maintien de l'abstinence, explique Charlotte Haas, responsable du développement des produits de spécialité chez Ethypharm. *Nous pourrons alors développer des comprimés avec un dosage qui permette au patient de n'en prendre qu'un ou deux, trois fois par jour, alors que le dosage actuel du baclofène à 10 milligrammes oblige à en prendre beaucoup plus. »* Si tout se déroule comme prévu, la mise sur le marché de cette nouvelle formulation pourrait avoir lieu en 2016. À la clé, une prescription dans le cadre plus sûr d'une AMM, mais dont le coût sera de toute évidence bien supérieur à celui du baclofène générique. ■

Jean-François Haït

Le baclofène est un médicament générique peu coûteux, dont les effets sur l'addiction à l'alcool et à la cocaïne ont été observés chez le rat en 1996. Ces dernières années, il est utilisé de manière empirique dans le traitement de l'alcoolisme.

© PATRICK ALLARD/REA

[1] O. Ameisen, *Le Dernier Verre*, Denoël, 2008.
[2] L. Rigal *et al.*, *Alcohol and Alcoholism*, doi: 10.1093/alcalc/ags028, 2012.

Pour en savoir plus

> **http://bit.ly/TEbEvj** Alcoolisme et médicaments, dans *Science*.

La cartographie de l'Uni

La collaboration internationale Planck devrait livrer dans le courant du premier trimestre la cartographie la plus précise du fond diffus cosmologique, lumière la plus ancienne émise par l'Univers.

Mission accomplie pour le satellite européen Planck. Grâce à ses observations réalisées entre 2009 et 2012, la cartographie la plus précise jamais réalisée du rayonnement fossile de l'Univers ou fond diffus cosmologique sera livrée en mars ou en avril. Il ne s'agit de rien de moins que de la première lumière émise par l'Univers, il y a 13,7 milliards d'années, soit 380 000 ans seulement après le Big Bang.

Pour comprendre ce qu'est ce fond diffus, il faut revenir juste avant ces 13,7 milliards d'années. L'Univers est alors extrêmement condensé, chaud et dense. L'énergie, sous forme de photons, interagit si fortement avec la matière ionisée que les photons sont piégés. À cause de l'expansion de l'Univers, la pression et la température diminuent. Quand cette dernière atteint 3 000 kelvins, les photons sont libérés. Cette libération, ce rayonnement, est ce que l'on appelle le fond diffus cosmologique. Il est toujours observable aujourd'hui.

On le dit « diffus » car il ne provient pas d'une source en particulier. Ses propriétés sont identiques dans toutes les directions du ciel. Sa température ? Elle a considérablement diminué en 13,7 milliards d'années pour atteindre désormais 2,726 kelvins. C'est notamment la mesure de cette dernière qui intéresse les cosmologistes ou plus exactement de ses infimes fluctuations, de l'ordre de 0,00001 kelvins. Elles donneront des informations sur les conditions initiales de formation des structures de l'Univers, à commencer par les galaxies.

Extrême sensibilité. À cette température, l'essentiel de l'énergie du rayonnement se situe dans le domaine de longueur d'onde millimétrique et submillimétrique. Pour mesurer ces variations, le satellite Planck a donc été doté d'un télescope muni de deux instruments d'une extrême sensibilité. Le HFI (pour instrument haute fréquence, en anglais), construit par un consortium dirigé par des Français de l'institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, a observé le rayonnement dans les longueurs d'onde allant de 0,33 à 3 millimètres. Le LFI (pour instrument à basse fréquence) a observé celles allant de 4 millimètres à 1 centimètre. Une des difficultés techniques était de maintenir la température du HFI proche de 0 kelvin, environ – 273° C. Plusieurs types de réfrigérateurs, dont le plus froid utilisait le très rare hélium-3, ont été couplés afin d'arriver à ce résultat. Observant le ciel pour la première fois dans neuf fréquences différentes, Planck apporte aux cosmologistes en quelque sorte neuf éclairages différents sur le rayonnement, représentés en neuf cartes.

Le satellite européen Planck a mené sa mission à bien durant près de trois ans. Avant d'arrêter d'observer le ciel début 2012, il a tourné sur lui-même afin de réaliser des cartes complètes, dans toutes les directions de l'espace, de ce rayonnement fossile. Sa position à 1,5 million de kilomètres de notre planète sur l'axe Soleil-Terre, le « point L2 de Lagrange », lui a permis de travailler dans un environnement thermique stable, avec le Soleil, la Terre et la Lune toujours dans son « dos », condition essentielle pour observer un rayonnement cosmique faible. Le satellite a ainsi pu faire plusieurs fois un relevé complet de l'Univers et transmettre ses données à la Terre.

L'essentiel

> **LE SATELLITE PLANCK**, lancé en 2009, a observé le premier rayonnement de l'Univers avec la plus grande précision jamais atteinte.

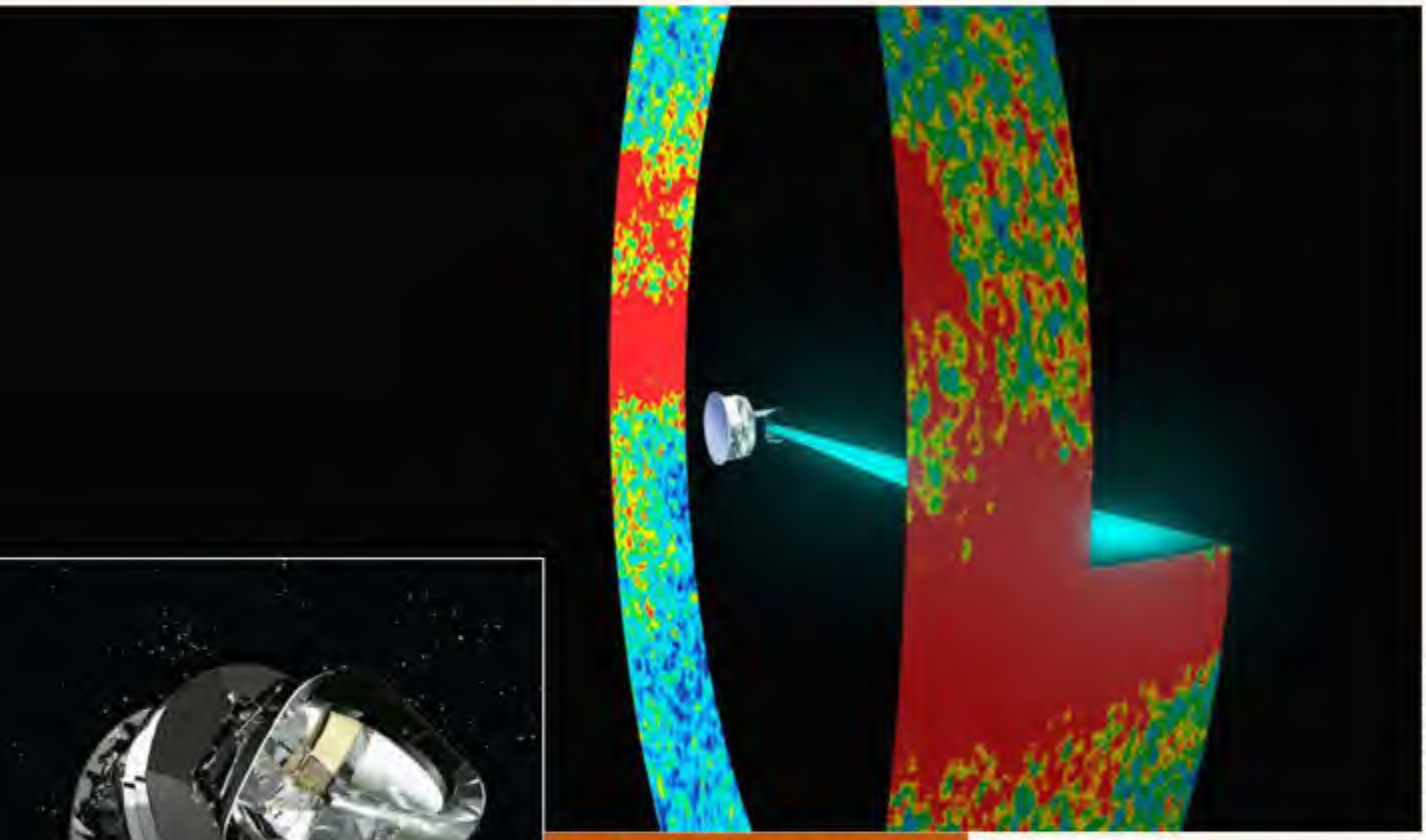
> **NEUF CARTES COMPLÈTES**, issues de ces observations du ciel, seront communiquées en mars ou avril 2013.

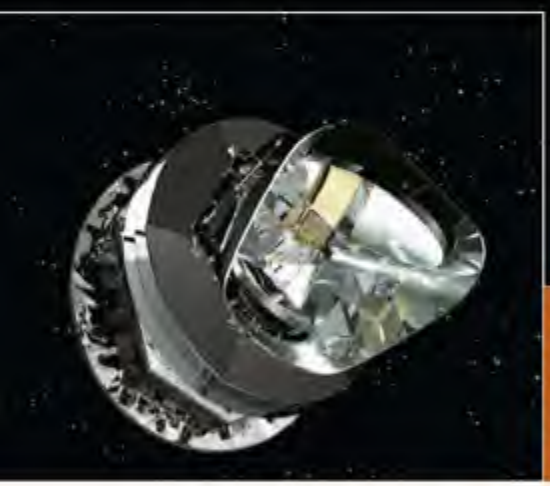
> **CES INFORMATIONS** permettront aux scientifiques de mieux comprendre la naissance de l'Univers et la formation des grandes structures cosmiques.

DU « BRUIT » INTÉRESSANT

Depuis le lancement du satellite Planck, en 2009, les chercheurs ont passé beaucoup de temps à retraiter les données afin de délivrer des résultats « 100 % sûrs ». Des années pour traquer tous les petits effets indésirables qui peuvent se superposer aux cartes de l'Univers : interférences, bruits, mais aussi galaxies. Et ces « bruits parasites » que sont les galaxies intéressent plus d'un chercheur. Ainsi, tandis que la mission principale de Planck était de cartographier le fond cosmologique, ces trois ans d'observation lui ont aussi permis de fournir une carte complète de l'Univers vu de la Terre : Voie lactée, étoiles en formation, galaxie, amas de galaxies.

vers très jeune





Le satellite Planck (vues d'artiste) a observé le fond diffus cosmologique en effectuant de grands cercles sur lui-même. Se décalant un peu à chaque tour, il couvrait l'ensemble du ciel tous les six mois. Au centre, on voit autour de lui la cartographie obtenue.
© IMAGE DE AOES MEDIALAB/ESA

© IMAGE DE C. CARREAU/ESA

« Il y aura un avant et un après Planck, s'enthousiasme Hervé Dole, astrophysicien à l'institut d'astrophysique spatiale d'Orsay au sein de la collaboration Planck. *On attend ces résultats depuis des années. Pour la cartographie du rayonnement lui-même, on aura tourné une page car on ne pourra rien faire de plus précis. »*

Premières galaxies. Les chercheurs du projet prévoient de donner à la communauté scientifique la totalité des informations recueillies lors d'une conférence internationale qui devrait se dérouler en mars ou avril prochain. *« Cette première lumière est très intéressante, car c'est la photographie de l'Univers très jeune,* explique Hervé Dole. *Elle renseigne sur les conditions de l'Univers à ses débuts. »* Dans les mois qui viennent, les informations recueillies par le satellite Planck vont permettre aux chercheurs de mieux mesurer la forme, l'âge et le contenu de l'Univers. Elles vont aussi permettre de mieux comprendre ce qui s'est passé après le Big Bang. Notamment la façon dont la matière s'est rassemblée pour former les premières galaxies et les amas de galaxies.

Les scientifiques ont encore du mal à comprendre en détail comment les galaxies ont pu se former aussi vite à l'échelle cosmologique. À l'époque du fond diffus cosmologique, même si les étoiles et les galaxies n'existaient pas encore, il y avait déjà des prémisses, des « grumeaux de matière » qui vont par la suite former les galaxies, les étoiles et les amas. *« Grâce à ces nouvelles données, on va les voir sous un nouveau jour »,* précise Hervé Dole. Pour lui, les cartes fournies par Planck sont *« tout ce que les cosmologues cherchent depuis des années ».* Jean Audouze, astrophysicien et directeur de recherche au CNRS, tempère : *« Ce serait formidable si l'accession à ces nouvelles précisions bouleversait la cosmologie mais rien n'est sûr à ce propos ! De mon point de vue, cette expérience est très bien menée, et je me plais à imaginer qu'il y aura des résultats bientôt que les gens extérieurs comme moi trouveront passionnants. »* ■

Gabrielle Carpel

Pour en savoir plus

> **http://tinyurl.com/la-recherche-planck-herschel** Le blog de *La Recherche.*

> **http://public.planck.fr** Le site du HFI.

Cinquième édition de la « bible » des psychiatres

La cinquième édition du manuel diagnostic et statistique des troubles mentaux sera publiée en mai. Le texte propose entre autres une nouvelle définition de l'autisme, loin de faire l'unanimité.

Deux enfants autistes jouent dans la cour de récréation d'un institut médico-éducatif à Paris. Ce type d'établissement dispense à ces enfants une éducation qui tient compte de leur degré d'autisme, dont la définition par l'Association de psychiatrie américaine est très critiquée. © JOËL ROBINE/AFP

Le cinquième manuel diagnostic et statistique des troubles mentaux (DSM-5) sortira en mai 2013. Depuis 1952, les psychiatres du monde entier s'appuient sur cet ouvrage pour établir les diagnostics psychiatriques tels l'autisme, la schizophrénie ou l'hyperactivité. La sortie du DSM-5, rédigé par 28 membres de l'Association de psychiatrie américaine (APA), était prévue pour mai 2012. Elle a été repoussée d'un an face aux critiques dont la rédaction a fait l'objet. Parmi les problèmes : des conflits d'intérêts entre des membres de l'APA et l'industrie pharmaceutique ou l'absence de prise en compte d'études contradictoires.

Le texte est en cours de modification. Certains diagnostics considérés comme abusifs ont été supprimés. C'est le cas du syndrome de risque de psychose, qui prônait la prescription de neuroleptiques pour les enfants de 4 à 6 ans statistiquement susceptibles de devenir psychotiques. Dans le cas de l'autisme, les oppositions sont vives mais le texte ne sera pas modifié. Le DSM-5 prévoit la création d'une catégorie des « troubles du spectre autistique », réunissant l'autisme, le syndrome d'Asperger, le trouble désintégratif de l'enfance et le trouble envahissant du développement non spécifié. Les nouveaux critères associés à cette catégorie seront plus stricts que ceux de l'autisme dans sa définition actuelle, si bien que les autistes les moins sévères, qui auraient été diagnostiqués autistes par le DSM-4, seront exclus des critères du DSM-5. ■ **Gautier Cariou**

Le suivi satellite de 800 000 poids lourds

Des GPS équiperont à partir de juillet 2013 les poids lourds qui circulent en France en vue de la mise en place d'une écotaxe.

Cet instrument en cours d'installation photographiera les véhicules et identifiera ceux assujettis à la taxe environnementale. Il servira aussi à vérifier le fonctionnement de leur GPS. © BERNARD ROUSSEAU/THALES

Une écotaxe destinée à rationaliser le transport routier et à réduire la pollution qu'il génère entrera en vigueur cette année en France. Son principe ? Faire payer aux véhicules de marchandises de plus de 3,5 tonnes environ 0,12 € par kilomètre parcouru sur le réseau national. Un projet qui repose sur la collaboration des entreprises SFR, SNCF, Steria et Thales avec Ecomouv', filiale d'un exploitant italien d'autoroutes.

Pour contrôler les camions concernés, cette dernière a développé un boîtier chargé de suivre les trajets effectués sur les routes taxées, soit plus de 15 000 kilomètres. *« Embarqué dans le véhicule, il se compose surtout d'un GPS qui permet de savoir quelles routes le camion a empruntées »*, explique le vice-président d'Ecomouv' Michel Cornil.

En effet, les voies taxées sont divisées en 4 000 tronçons, identifiés au sol par des coordonnées GPS. *« Quand le camion traverse cette zone, cette donnée est enregistrée dans le boîtier. Elle est ensuite envoyée grâce à une antenne au centre d'exploitation où la taxe à payer est calculée »*, indique le dirigeant. Le transporteur réglera alors son dû par abonnement ou prépaiement. En juillet, l'écotaxe devrait toucher 800 000 véhicules, dont 25 % de camions étrangers. ■ **Clément Delorme**

Un rapport européen sur les perturbateurs endocriniens

L'Autorité européenne de sécurité des aliments publiera en mars un avis sur les substances actives présentes dans l'alimentation.

Retrouvés dans l'alimentation, certains pesticides, produits chimiques ou polluants peuvent interagir avec notre système hormonal et provoquer des problèmes de santé, à l'image du Bisphénol A dont les méfaits ont été épinglés récemment. Ces « perturbateurs endocriniens » feront l'objet d'un avis scientifique émis par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) en mars 2013. Ces substances sont de plus en plus observées. Mais leur étude est complexe : comment identifier ces molécules, parmi le cocktail de composés auxquels notre organisme est soumis ? Comment dissocier l'influence d'une substance active sur le système hormonal des facteurs physiologiques ou environnementaux normaux ? Et comment mettre en place des méthodes d'évaluation fiables et précises pour analyser et quantifier ces risques ? A travers ce rapport, l'EFSA souhaite compiler tous les travaux et les informations disponibles, afin de disposer d'une unique feuille de route qui facilitera ensuite les démarches opératoires. Dans une volonté d'homogénéisation, les autorités européennes du médicament, des produits chimiques et de l'environnement sont aussi associées à ces travaux. ■ **Caroline Guignot**

© BERNARD MARTINEZ/LOOKATSCIENCES

Les récipients en plastique, telles les bouteilles d'eau, sont susceptibles de contenir du Bisphénol A, substance dont les effets négatifs sur la santé sont confirmés.

Premier essai clinique pour les cellules iPS

Très attendu par la communauté scientifique, le premier essai clinique utilisant des cellules reprogrammées pour traiter une maladie de l'œil est prévu pour la fin de l'année au Japon.

Il ne manque que la validation du ministre de la Santé japonais pour le lancement, d'ici la fin 2013, de la première application dans le traitement curatif d'une maladie des cellules iPS, cellules adultes reprogrammées en cellules capables de se différencier en tous les types cellulaires. La maladie concernée ? La dégénérescence maculaire liée à l'âge qui affecte la vision de près de 30 % des plus de 55 ans dans le monde. Cet essai clinique sera réalisé par l'équipe du Japonais Shinya Yamanaka, Prix Nobel de physiologie 2012 pour la découverte des cellules iPS. Son protocole consiste à greffer chez les patients un tissu de cellules rétiniennes obtenues à partir de cellules iPS. « *La communauté scientifique est impatiente de connaître la tolérance des patients à ces greffes, pour envisager d'autres essais visant à soigner des maladies de la peau* », souligne Mathilde Girard, de l'Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques. ■ **Lise Loumé**

et aussi...

STOCKAGE RADIOACTIF

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs souhaite la création, à Bure, dans la Meuse, d'un centre industriel de stockage géologique destiné à accueillir les déchets français les plus radioactifs. Afin d'informer et de consulter toutes les personnes concernées par ce projet, la Commission nationale de débat public organisera une quinzaine de réunions du 1er mars au 30 juin 2013.

CONFLITS D'INTÉRÊTS

À partir de mars 2013, les producteurs américains de médicaments devront déclarer leurs conflits d'intérêts avec les professionnels de santé. C'est à ce moment qu'entrera en vigueur le « sunshine act », un amendement signé par Barack Obama qui obligera l'industrie pharmaceutique a déclarer la valeur de ses gestes en faveur des médecins et des hôpitaux, dès lors qu'ils dépassent 100 dollars par an.

L'IMPACT DU VÉGÉTAL URBAIN

Comment intégrer le végétal urbain dans une ville durable ? Les résultats d'une étude menée par l'Institut de recherche sciences et techniques de la ville seront dévoilés en septembre 2013. Deux scénarios d'évolution de la ville ont été étudiés - la laisser s'étaler ou la contenir - en faisant varier la végétation au sol, hors sol, autour des bâtiments, etc. Premiers résultats ? L'impact d'une façade végétale serait plus intéressant sur le bâtiment en regard que sur le bâtiment lui-même.

Une rue artificielle en laboratoire

Pour mieux étudier les difficultés des malvoyants dans l'espace urbain, l'Institut de la vision va inaugurer un laboratoire high-tech.

Le laboratoire StreetLab (ici en vue d'artiste), reproduira l'espace d'une rue. On pourra y analyser dans le détail les mouvements des malvoyants dans l'espace urbain pour évaluer des outils destinés à les aider. © INSTITUT DE LA VISION

L'Institut de la vision, à Paris, va mettre en œuvre au printemps une nouvelle plate-forme technologique qui reproduira en intérieur l'espace d'une rue. Appelé StreetLab, ce laboratoire permettra d'étudier les difficultés des déficients visuels dans leurs déplacements urbains, pour mieux évaluer l'efficacité de produits et de services destinés à améliorer leur autonomie. StreetLab aura une surface de 60 mètres carrés, dans lesquels le trottoir et la chaussée seront représentés fidèlement. Tout l'espace sera équipé de capteurs visuels, de micros et de caméras de capture des mouvements.

Cela permettra aux chercheurs d'observer avec la plus grande précision des volontaires malvoyants dans leurs mouvements dans l'espace urbain. *« L'éclairage, le fond sonore, les obstacles, tout ce qui forme le milieu d'une rue sera paramétrable avec précision : notre objectif est de rendre nos essais reproductibles »*, détaille Emmanuel Gutman, responsable du projet. Ainsi, les industriels qui souhaitent tester leurs produits pourront le faire de manière fiable dans StreetLab. Mais le laboratoire offrira également des formations, de l'assistance et du conseil, à destination, par exemple, des collectivités territoriales, des acteurs publics ou des constructeurs désireux d'améliorer l'accessibilité de leurs établissements. Ce projet innovant a été réalisé avec l'aide de la Fondation Voir et entendre, de la Caisse des dépôts et de l'université Pierre-et-Marie-Curie. ■

Fiorenza Gracci

Le vécu des donneurs de rein

L'Agence de biomédecine va remettre le deuxième volet de son étude sur la qualité de vie des donneurs vivants de rein. Il devrait rassurer sur l'incidence de ce geste.

Les équipes médicales françaises effectuent peu de greffes de rein issues de donneurs vivants. Pourtant, 97 % des donneurs ont déclaré avoir une santé excellente à la suite de l'opération. © RAJAU PHANIE

En France, les équipes médicales recourent encore peu aux greffes de rein issues de donneurs vivants, alors qu'elles donnent de meilleurs résultats que celles réalisées à partir de reins prélevés sur des personnes décédées. Afin de rassurer les donneurs potentiels et d'augmenter l'acceptation des professionnels de santé, l'Agence de biomédecine a entrepris une étude en deux volets qui décrit la qualité de vie de personnes ayant réalisé un tel don. Le second volet devrait être livré au second semestre 2013.

Des questionnaires ont été soumis aux donneurs de rein au cours des 12 mois suivant le don, de manière à ce qu'ils décrivent leur ressenti immédiat après la greffe. Ils devaient aussi dire s'ils avaient eu ou non des complications liées au prélèvement. Les données du premier volet de l'étude laissent en effet entendre que la technique opératoire utilisée – la cœloscopie, moins invasive que la chirurgie ouverte – est moins risquée. Les conclusions de ce travail seront accompagnées de recommandations sur l'accompagnement social et psychologique du donneur, du receveur et du reste de la famille.

Ce second volet complétera les informations du premier qui s'est intéressé de manière rétrospective au vécu médical, social et psychique de 501 personnes ayant réalisé le don entre 2005 et 2009 : il a montré que 97 % d'entre elles déclarent avoir une santé excellente, très bonne ou bonne, et que 98 % seraient prêtes à le refaire. ■ **Caroline Guignot**

Des déchets miniers contre le cancer

Au printemps, Areva ouvrira dans le Limousin un laboratoire de production de plomb-212, élément rare qui entre dans la composition d'un traitement contre le cancer.

Le premier site de fabrication de plomb-212, forme très rare de plomb, ouvrira en France courant 2013. Il sera localisé dans un centre de recherche et développement en chimie situé à Bessines-sur-Gartempe, dans le Limousin. Ce site permettra à la filiale médicale du groupe Areva de valoriser les combustibles recyclés provenant de ses activités minières tout en fournissant un élément essentiel au développement d'un nouveau traitement contre le cancer.

© JEAN-MICHEL PERICAT/AREVA

Le futur site d'Areva sera destiné au recyclage de déchets miniers et à l'élaboration d'un nouveau traitement contre le cancer.

Car cette forme de plomb, associée à un anticorps, permet de cibler les cellules cancéreuses pour les détruire. Et ce, sans endommager les cellules saines. Ce procédé, dit de radio-immunothérapie alpha, est en phase de tests cliniques aux États-Unis. Il sera développé conjointement par Areva Med et les laboratoires Roche. Ce projet, lancé en 2005, pourrait à terme permettre de traiter des cancers contre lesquels la chimiothérapie n'est pas efficace, tels les cancers du pancréas ou des ovaires. Le groupe, qui travaille en collaboration notamment avec l'Institut national américain du cancer et l'Inserm, espère une mise sur le marché en 2018. ■ **Rémi Canali**

Un réseau de satellites pour surveiller la Terre

L'Europe va lancer un des plus gros projets de surveillance de la planète grâce à un réseau de satellites suréquipés, les Sentinel. Le premier décollera en 2013.

Fin 2013, l'Agence spatiale européenne (ESA) va envoyer dans l'espace le premier satellite de la mission « Sentinel » du programme de surveillance mondiale pour l'environnement et la sécurité. Ce projet européen, qui devrait compter une dizaine de satellites d'ici 2015, a pour objectif de fournir des informations environnementales et sociales.

Sentinel-1 sera dédié à l'observation des terres et des océans par système radar. Il fournira des données utiles à la gestion des catastrophes naturelles, en particulier les inondations, ainsi qu'à la cartographie. Ce radar, à même de photographier à travers les nuages, sera idéal pour surveiller les régions polaires. Financés par les États européens, les satellites Sentinel succèdent à « Envisat », qui a observé la Terre durant près de dix ans. Ce programme, deuxième plus gros projet européen après Galileo, sera mené par la Commission européenne, et l'ESA sera en charge de la construction et du suivi des satellites. ■ **Gabrielle Carpel**

et aussi...

PASTEUR À L'UNESCO

L'Académie des sciences et la Bibliothèque nationale de France remettront en mars 2013 un premier rapport à l'Unesco pour l'inscription des archives de Pasteur à son programme Mémoire du monde. Si l'intérêt universel des écrits du chercheur français est reconnu, ses quelque 150 registres de laboratoire et des documents sur la génération spontanée ou les vaccins pourront être numérisés.

NUCLÉAIRE JAPONAIS

L'Autorité japonaise de régulation du nucléaire mise en place après l'incident de Fukushima travaille sur de nouveaux critères de sécurité pour les centrales. Elle devrait en publier une version préliminaire en mars avant d'adopter un texte final en juillet. Chaque réacteur nucléaire nippon sera ensuite examiné au cas par cas en fonction des nouveaux critères de sécurité avant d'être, peut-être, remis en marche.

LA RECHERCHE SUR LES VACCINS RÉCOMPENSÉE

La Commission européenne décernera pour la première fois son prix pour la technologie des vaccins durant le quatrième trimestre de l'année. Il récompensera à Bruxelles une équipe de chercheur parmi une trentaine d'autres d'une somme de 2 millions d'euros. Les participants sont incités à se concentrer sur la stabilisation de l'efficacité des vaccins, même après rupture de la chaîne de froid.

Le lac Léman scruté par des ULMs

La qualité de l'eau du lac Léman sera mesurée depuis le ciel grâce à une caméra hyperspectrale.

Ce submersible a permis aux chercheurs, dans la première partie du projet Elemo, de mettre en évidence la présence des métaux lourds dans le lac Léman. © JEAN-MARC BLACHE-EPFL

Tourisme, pêche industrielle, approvisionnement en eau douce d'un million de riverains..., le lac Léman, plus grand lac alpin d'Europe centrale, est soumis à une très forte activité humaine. Afin d'éviter que la qualité de son eau ne se dégrade trop, comme ce fut le cas au milieu du siècle dernier, l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a décidé de le surveiller sous toutes ses coutures. Après avoir ausculté le fond du lac au moyen de submersibles en 2011, l'EPFL va cette année étudier la couche superficielle du lac, sur une profondeur de quelques mètres seulement, dans le cadre du programme Elemo. En mai, ce dernier lancera ainsi une série d'analyses de la surface de l'eau. L'objectif est de mettre en place un système de capteurs pour mesurer facilement la qualité de l'eau.

Pour y parvenir, les chercheurs suisses auront recours à deux ULMs bardés d'instruments d'analyses, dont un prototype de caméra dite hyperspectrale. *« Elle permet de mesurer simultanément 300 spectres à des longueurs d'onde comprises entre le bleu et l'infrarouge*, explique François Golay, l'un des coordinateurs du projet. *Elle pourrait peut-être révéler la présence de micropolluants. »* Lancés à plus de 60 kilomètres par heure à environ 300 mètres d'altitude, les ULMs seront alors capables de cartographier les 581 kilomètres carrés du lac en seulement 30 heures. *« Si tout va bien !* nuance le chercheur. *Cette méthode reste très tributaire des conditions météorologiques ».* ■

Clément Delorme

Le « repas » d'un trou noir

Les astrophysiciens en sauront bientôt plus sur le trou noir situé au centre de notre galaxie, grâce à l'analyse de l'un de ses futurs « repas ».

« Je suis impatient d'observer pour la première fois un tel événement », confie Stefan Gillesen, astrophysicien à l'institut Max Planck, en Allemagne. Dès septembre prochain, « Sagittarius A* », trou noir situé au centre de la Voie lactée, aspirera un nuage de gaz d'une masse trois fois supérieure à celle de la Terre, et ce jusqu'en 2014. Un phénomène rare car ce trou noir supermassif, le plus proche de notre planète, a un environnement pauvre en matière.

Un nuage de gaz, en rouge et orange sur cette vue d'artiste, va se désintégrer en passant à proximité du trou noir situé au cœur de notre galaxie. Les lignes bleues représentent l'orbite des étoiles autour du trou noir. © MARC SCHARTMANN-MPE/ESO

Et à 40 milliards de kilomètres de lui, distance proche à l'échelle astronomique, le nuage ne pourra plus lui échapper. L'équipe de Stefan Gillesen est à l'origine de la découverte, au printemps 2011, de ce nuage gazeux constitué d'hydrogène et d'hélium. Les chercheurs l'ont repéré par sa température de 280 °C, bien inférieure à celle des étoiles environnantes. Au fur et à mesure que le nuage s'approchera du trou noir, il devrait émettre des rayons X observables par les astrophysiciens, avant de se disloquer entièrement et de disparaître. *« En attendant, il devrait nous apprendre beaucoup sur le mouvement de la matière autour d'un trou noir et sur la manière dont celui-ci l'aspire »*, se réjouit Stefan Gillesen. ■ **Lise Loumé**

Un accélérateur de particules à Caen

Un accélérateur de particules composé de cavités accélératrices supraconductrices à la pointe de la technologie permettra d'obtenir des faisceaux de particules plus intenses.

Le projet Spiral2, mis en place en partenariat entre le CNRS et le CEA à Caen, au Grand accélérateur national d'ions lourds, va débuter cette année l'assemblage de son accélérateur de particules. Une partie des bâtiments destinés à accueillir cet accélérateur linéaire est en effet achevée. Les chercheurs regroupés en Basse-Normandie peuvent donc démarrer l'élaboration de la phase 1 du projet.

Cette dernière sera consacrée à la formation de neutrons obtenus en séparant à très grande vitesse le proton et le neutron d'un deuton (une forme rare de l'hydrogène qui contient un exemplaire de ces deux particules élémentaires) grâce à une « cible » en graphite. Elle permettra aussi de produire des ions lourds utilisés pour obtenir des noyaux superlourds bien plus difficiles à observer. Cet accélérateur sera composé d'une vingtaine de cavités accélératrices supraconductrices uniques en France, censées autoriser la formation d'une puissance de faisceaux encore inégalée. Avec cette technologie de pointe, les chercheurs espèrent observer plus fréquemment l'apparition de nouveaux éléments hors tableau périodique. ■ **Clément Delorme**

© P. DUMAS/CEA

Un des éléments de l'accélérateur de particules Spiral2 est en construction dans une salle blanche. Le tout sera implantée au Grand accélérateur national d'ions lourds, à Caen.

Mieux récupérer ses souvenirs

Une méthode a été mise au point à Lyon pour compenser la perte de mémoire autobiographique associée à la sclérose en plaques.

Des neuroscientifiques français ont développé la première méthode pour améliorer la mémoire autobiographique des personnes atteintes de sclérose en plaques. Ces travaux seront détaillés dans une thèse doctorale en octobre. La maladie provoquant des lésions dans le cerveau, les patients ont souvent des difficultés à se rappeler leur vécu : une perte de mémoire autobiographique difficile à vivre. Pour améliorer leur état, les chercheurs du laboratoire d'imagerie et neurosciences cognitives de l'université de Strasbourg ont testé un programme cognitif d'assistance. Ce dernier recourt à l'« imagerie mentale visuelle », capacité de l'esprit de se représenter mentalement les événements. Durant 6 semaines, le patient s'entraîne avec un neuropsychologue à se remémorer des détails liés aux situations vécues. Il renforce ainsi la capacité de son cerveau à récupérer ses souvenirs. Les résultats encourageants ont fait l'objet de deux publications : les chercheurs ont trouvé par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle une activité plus intense des zones du cerveau impliquées dans la récupération de souvenirs. ■ **Fiorenza Gracci**

et aussi...

L'ASPARTAME : DANGEREUX POUR LA SANTÉ ?

Un avis de l'Autorité européenne de sécurité des aliments sur l'aspartame sera publié en mai. Les experts prennent le temps d'analyser de nouvelles données sur les effets de l'édulcorant, et de réaliser une consultation publique. En cause : la toxicité des substances dérivées de l'aspartame qui se révèlerait dans certaines conditions de stockage.

LE CODE MINIER FAIT PEAU NEUVE

Un nouveau code minier devrait entrer en application en France à la fin du premier trimestre. Ce code régit les droits de propriété, d'exploitation et de prospection du sous-sol. Les principales modifications concerneront la fiscalité et l'adaptation à la Charte de l'environnement. Créé en 1956, ce code a subi de nombreuses modifications sans jamais être remanié.

L'INTÉRÊT THÉRAPEUTIQUES DES MÉDICAMENTS

Une base de donnée publique sur les médicaments devrait être mise en ligne en mars. Réalisée par l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé, avec la Haute Autorité de santé et l'assurance-maladie, elle contiendra, en plus des caractéristiques des médicaments, leur évaluation. Celle-ci, mise à jour régulièrement, précisera pour chacun son efficacité et son intérêt thérapeutique.

*Les Assises nationales de la recherche et de l'enseignement supérieur, qui se sont tenues fin novembre au Collège de France, dessinent l'organisation de la recherche française voulue par le gouvernement. Fin du rôle pilote de l'Agence nationale de la recherche, refonte de l'évaluation des chercheurs, lutte contre la précarité... **Geneviève Fioraso** dévoile sa stratégie.*

« Je veux une recherche apaisée et moins bureaucratique »

Geneviève Fioraso, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, a effectué l'essentiel de sa carrière à Grenoble, où elle est adjointe au maire Michel Destot. Elle a enchaîné les postes politiques et de gestion d'entreprise, en lien avec la recherche et l'innovation. Depuis 2007, elle est députée de la première circonscription de l'Isère. Lors de la précédente législature, elle a été membre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, où elle a présenté un rapport sur la biologie de synthèse.

LA RECHERCHE : Nous publions dans ce numéro un palmarès des 10 plus belles découvertes scientifiques en 2012. Quel est votre choix personnel ?

GENEVIÈVE FIORASO : Le boson de Higgs. J'ai été frappée de voir l'intérêt, l'adhésion populaire autour d'une découverte aussi abstraite. Une notion tellement compliquée que même des physiciens ont du mal à vous l'expliquer. Le fait que le public soit fasciné par une telle complexité redonne de l'espoir quant à sa confiance envers la recherche, sa curiosité et son envie de découverte. Et puis il y a cette belle chose de voir Peter Higgs, qui, il y a près de cinquante ans, sur une intuition, prédisait l'existence de cette particule. Il a pu prouver qu'il avait raison grâce au progrès technologique, qui a permis les accélérateurs de particules, tel le Grand collisionneur de hadrons. Cela signifie que l'on est capable d'imaginer des choses improbables qui se vérifient des dizaines d'années après. La créativité nourrit la recherche fondamentale.

La découverte du boson est-elle porteuse de sens pour la science française ?

G.F. On voit bien que oui. Il faut soutenir la science la plus fondamentale si l'on veut avoir des applications industrielles, plus tard, grâce à des innovations de rupture. Lorsque l'on discute avec Serge Haroche, Nobel de physique 2012, on pressent que l'optique quantique qu'il explore depuis plus de trente ans aura des conséquences sur de nouveaux ordinateurs, avec des modes de calculs complètement différents. Mais il nous dit qu'il ne sait pas encore quelles seront les répercussions de sa recherche, qu'il y en aura, mais qu'il ignore lesquelles. Un autre grand chercheur, le glaciologue Claude Lorius, n'avait pas imaginé un instant que ses carottages de glace en Antarctique puissent un jour servir à mesurer le réchauffement climatique. Quant au physicien Albert Fert, prix Nobel en 2007, le financement de ses recherches fondamentales n'aurait probablement pas été accepté par l'Agence nationale de la recherche (ANR) telle qu'elle fonctionne actuellement. Or, dans ma circonscription, il y a bel et bien une jeune entreprise qui commercialise des jeux vidéo fondés sur les technologies d'Albert Fert ! Cela veut bien dire qu'il faut toujours garder des ouvertures et faire confiance, *a priori*, à l'imagination et à la créativité.

Vous présenterez en 2013 une loi pour l'orientation de l'enseignement supérieur et de la recherche. Encore une ?

G.F. Elle est nécessaire pour simplifier un paysage de la recherche française devenu illisible pour tous les acteurs : accumulation des structures, gestion des personnels, structures de financement des chercheurs... Notre texte va remédier aux dysfonctionnements créés par la loi LRU (loi relative aux libertés et responsabilités des universités). Il s'agit notamment de rendre possible l'autonomie des universités en leur apportant les moyens financiers dont elles ont besoin pour faire face à leurs charges. Plus généralement, il nous faut définir une nouvelle organisation de la recherche avec de >>>

© PHOTOS : STÉPHANIE AUDRAS/REA

« Je veux une recherche apaisée et moins bureaucratique »

Entretien avec Geneviève Fioraso

>>> grands établissements universitaires et les pouvoirs publics dans le rôle du stratège.

C'est donc à l'État d'occuper le siège du pilote ?

G.F. L'État doit prendre ses responsabilités et donner les grandes orientations. Une agence comme l'ANR doit être un outil au service d'une programmation, mais elle n'a pas vocation à décider de la stratégie. C'est aux pouvoirs publics de la définir, en coopération étroite avec les organismes de recherche. Par ailleurs, nous entendons respecter le temps long de la recherche fondamentale en faisant confiance aux scientifiques. La recherche, ça n'est pas le Gosplan ! Nous allons par exemple allonger la durée des « programmes blancs », sans thèmes imposés, et ne pas exiger de planning de résultats quand il est impossible d'en fixer un. Il s'agit de redonner aux chercheurs le temps de faire leur métier : mener leurs propres travaux et animer leurs équipes pour faire en sorte qu'elles soient productives. Certains auront envie d'enseigner : il faut les y encourager. La loi devra permettre une fluidité entre les tâches de recherche et celles d'enseignement, par exemple en fixant un volume horaire à répartir selon les capacités et les envies. À l'université, un enseignant brillant tire tout le monde vers le haut. Je suis frappée de voir combien les cours de certains grands professeurs de médecine devant des amphithéâtres de premières années sont bénéfiques et passionnent les étudiants.

Dans votre schéma d'organisation de la recherche, vous envisagez de grands établissements et des « stratégies de site ». Que recouvre ce terme ?

G.F. Nous voulons faire travailler ensemble les grands établissements universitaires, les organismes de recherche, les pôles de compétitivité, les collectivités territoriales et les représentants de l'industrie. L'idée est de les regrouper dans un comité stratégique qui n'empiète pas sur les missions des universités, mais qui propose des projets de développement communs où chacun apporte son expertise. Par exemple, il nous faut des représentants de l'industrie qui sachent anticiper les métiers et aider les universitaires à définir des filières. Les régions me paraissent être le bon échelon pour définir ces schémas d'intérêt général, d'autant qu'elles peuvent se regrouper, se mettre en réseau et travailler avec les villes pour aménager les campus, créer des logements pour étudiants et professeurs, faciliter les transports. Les stratégies de site, ce sont la mise en place de synergies, de fédérations, de confédérations entre acteurs de la recherche. Le contraire d'une usine à gaz avec une grande structure pilotée par le ministère qui distribuerait des médailles en chocolat aux personnes les mieux placées ou les plus en vue.

Quel nouveau rôle pour l'ANR ?

G.F. Elle ne doit plus se substituer à l'État pour la définition des grandes orientations. L'ANR doit se concentrer sur la gestion des financements sur projets avec beaucoup moins de bureaucratie. L'excès de paperasses nuit à la productivité de la recherche ! Nous envisageons une procédure en deux temps. Nous réfléchissons à une possibilité de soumission d'un préprojet, sorte de lettre d'intention sans le détail des éléments financiers, suivi, s'il est admissible, d'un texte plus détaillé. Et, pour éviter que les chercheurs désireux de sécuriser leurs financements ne multiplient les réponses aux appels d'offres ANR avec un taux d'échecs très important, nous les limitons dès cette année à un projet par an et par coordonnateur scientifique.

Et les alliances ? Comment s'intègrent-elles dans ce paysage ?

G.F. Elles sont essentielles pour avoir une vision thématique, par exemple dans le domaine des sciences du vivant et de la santé. Il ne faut surtout pas les sédentariser et les transformer en institution. Elles doivent rester des structures légères, sans dotation propre, des lieux d'échanges et de partage de stratégie. Elles nous seront aussi très utiles pour exister en Europe et faire des propositions dans le cadre du futur programme « Horizon 2020 ».

À ce propos, où en est la recherche française dans le cadre européen ?

G.F. Nous avons cédé du terrain, il faut absolument le regagner. Dans le dernier programme-cadre, nous ne sommes plus qu'à 11,4 % de taux de retour alors que nous contribuons à hauteur de 18 %. Il faut savoir que nous sommes le deuxième contributeur, derrière l'Allemagne, et que notre taux de succès aux appels d'offres est bon, de l'ordre de 25 %. Ce qui veut dire que nous avons moins candidaté ces dernières années. En effet, il y a eu une telle frénésie de dépôts d'appels d'offres, entre les ANR, les clusters, les pôles de compétitivité... que l'Europe a été délaissée. Or, c'est notre avenir qui est ici en cause. Sans l'Europe et son « Horizon 2020 », comment amplifier notre recherche nationale pour pouvoir être visible au niveau international ? Malgré notre très bonne position de sixième mondial pour les publications scientifiques et de quatrième mondial dans le système européen des brevets, nous risquons,

sans l'impulsion de l'Europe, de nous replier sur nous-mêmes et à terme, de reculer.

Si la France est dans le peloton de tête des nations scientifiques, ses institutions sont peu visibles dans le classement de Shanghai.

G.F. On sait bien que ce classement se fonde sur des critères anglo-saxons qui ne nous favorisent pas. Ainsi, il ne prend pas en compte les sciences humaines et sociales, ni le nombre d'étudiants accueillis et diplômés des universités. Il privilégie la signature unique, alors que nos publications sont cosignées par des chercheurs venant de plusieurs organismes de recherche. Le classement est réalisé par une poignée de personnes qui surfent sur les sites Web des institutions sans chercher à en savoir plus. C'est ainsi que l'université de Strasbourg, où travaille Jules Hoffmann, Prix Nobel de médecine, n'a pas été prise en compte dans le dernier classement en raison d'un retard de mise en ligne sur le site suédois du prix Nobel ! Plus pertinent que le classement de Shangai, nous avons en Europe un classement, « U-Multirank », qui a été mis en œuvre par les Allemands et qui comporte plusieurs entrées. Il reflète mieux la réalité de la recherche, de ses territoires et ses performances.

Respecter le temps long de la recherche fondamentale en faisant confiance aux scientifiques

Dans une économie de la connaissance mondialisée, faut-il collaborer avec les puissances scientifiques émergentes comme la Chine et l'Inde, ou entrer en compétition frontale ?

G.F. Nous devons coopérer tout en restant vigilants. La Chine, par exemple, est un pays où souffle encore un esprit pionnier, et c'est une bonne chose de les côtoyer. De plus, c'est un grand marché, et nous avons besoin que nos entreprises puissent y vendre leurs produits. Mais cela ne veut pas dire que nous devons être naïfs : il faut se préoccuper de la propriété intellectuelle et des modalités des transferts de technologie.

Parmi tous les sujets abordés fin novembre lors des Assises nationales de l'enseignement supérieur et de la recherche, la question de l'évaluation ne fait pas consensus. Quelle est votre position ?

G.F. C'est en effet une question qui divise, et, de ce point de vue, il n'est pas aberrant que le politique s'en empare. Chacun d'entre nous est évalué dans sa vie professionnelle (les élus, par exemple, par les votes des électeurs), et c'est légitime. Concernant la recherche, on doit d'abord réfléchir à l'évaluation du chercheur. Elle doit se faire au plus près du laboratoire dans lequel il travaille. Elle doit être une démarche positive, qui vise à faire progresser la personne, y compris lors de difficultés parfois liées à un contexte particulier. Quant à l'évaluation des projets de recherche, elle doit se faire dans un climat de confiance *a priori*, et d'une évaluation *a posteriori*, non tatillonne. Concernant la recherche fondamentale, il faut instaurer des points d'étape adaptés au type de projet. Enfin, l'évaluation des organismes ne doit pas être perçue par ces derniers comme un rapport de la Cour des comptes, à charge, sans discussion préalable. Elle doit se faire dans le dialogue.

Faut-il supprimer l'Aeres* ?

G.F. Cet organisme présente des dysfonctionnements, pour autant nous ne souhaitons pas revenir aux anciennes évaluations. Rien n'est encore fixé, mais nous sommes clairs sur les objectifs. Il est nécessaire d'avoir des experts qui connaissent leurs sujets, et on peut les trouver dans les organismes de recherche. Il faut, tout autant, éviter la consanguinité et, pour cela, solliciter des personnalités extérieures et étrangères. Je veux, sur ces sujets, un apaisement et, surtout, moins de paperasse. S'il doit y avoir des évolutions dans un projet, ce n'est pas un drame ! Il faut en tenir compte dans l'évaluation dans un esprit de souplesse.

Autre sujet qui fâche, la situation de précarité de l'emploi qui concerne un grand nombre de chercheurs, ingénieurs, techniciens, enseignants et administratifs. Est-ce une fatalité ?

G.F. Pas du tout ! Tout d'abord, nous nous attaquons à la précarité dans les universités : des fonds ont été débloqués pour traiter le cas de 8 000 personnes sur quatre ans. Ensuite, il s'agit de responsabiliser les organismes de recherche qui ont embauché, ces dernières années, du personnel pour une durée limitée en vue de répondre aux appels d'offres de moyenne durée. On ne peut pas mettre ces gens à la porte sans essayer de trouver une solution. D'autant que les organismes ont reçu des dotations supplémentaires pour remplacer tous leurs départs à la retraite. Ils peuvent les utiliser pour titulariser des personnels en fin de contrat. Il s'agit aussi de limiter le risque de précariser encore, et c'est pour cette raison que nous limiterons l'appel aux contractuels dans les nouveaux contrats ANR. Mais attention aussi à ne pas oublier d'intégrer des jeunes. Les organismes ont besoin de talents qui ne demandent qu'à s'exprimer.

■ **Propos recueillis par Aline Richard**

* **L'AERES** (Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur) a été créée en 2007 par le gouvernement de François Fillon.

Cahier spécial réalisé dans le cadre de l'événement Tremplin Doctorants Entreprises
organisé le 22 novembre 2012

TREMPLIN DOCTORANTS ENTREPRISES L'EMPLOI DES DOCTEURS

En partenariat avec : MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE | les Rendez-Vous de l'Emploi | ABG L'intelli'agence | AFDIR | PARIS DIDEROT

LES DOCTEURS FACE À L'ENTREPRISE

La 2e édition de Tremplin Doctorants Entreprises a réunit près de 500 personnes et plus d'une vingtaine d'entreprises pour échanger sur les potentiels de carrière qui s'ouvrent aux docteurs, aussi bien en sciences dures que sociales.

Dans le domaine des sciences dites «dures», les entreprises françaises reconnaissent chaque jour davantage le rôle clé que sont amenés à jouer les docteurs. Ils ont découvert leurs compétences. Surtout, dans le contexte actuel de compétition internationale féroce, l'industrie est de retour en grâce et l'innovation est devenue son Graal. L'innovation, c'est-à-dire, le plus souvent, le résultat d'une activité de recherche et de développement (R&D). Et qui est mieux à même d'effectuer cette R&D si ce ne sont les docteurs, ces chercheurs dans l'âme? La situation est à cet égard très claire: l'emploi des docteurs a été beaucoup moins affecté que les autres en ces temps de crise, comme en témoigne une récente étude de l'APEC. Étude qui souligne plusieurs facteurs favorables à leur recrutement, en particulier le crédit d'impôt recherche, qui incite les entreprises à soutenir leur effort de R&D.

Le tableau est plus contrasté pour les docteurs en lettres, sciences humaines et sociales, autrement dit les LSHS. Ils manquent encore de visibilité et de lisibilité pour les entreprises. En effet, à la différence de leurs homologues des sciences exactes, ce n'est pas leur sujet de thèse, le plus souvent, qui est à l'origine de leur embauche, mais essentiellement leurs compétences «transverses» acquises au cours d'un long cursus. Des savoirs indéniables, fort utiles aux entreprises, mais qui restent mal appréhendés.

Reste que pour les doctorants le monde des entreprises est bien souvent une grande inconnue. Quels sont ses règles, ses besoins, ses attentes ? Comment communiquer avec elles ? Comment les intéresser ? Quel poste y trouver ? Pour y faire quoi ? C'est pour leur donner les éléments de réponse que *La Recherche* a réédité cette année la journée Tremplin Doctorants Entreprises.

PROFESSIONNALISER LE DOCTORAT

Hyperspécialisés et formés par la pratique de la science, les docteurs sont des experts potentiels au sein de l'entreprise.

Méfiance des entreprises envers les docteurs. Polarisation de l'Université sur la formation d'enseignants et de chercheurs. Lors de la séance plénière de la journée Tremplin Doctorants Entreprises qui s'est tenue le 22 novembre dernier à l'université Paris-Diderot, Christine Clerici, vice-présidente du conseil d'administration de Paris-Diderot, a rappelé ces freins traditionnels à l'emploi des docteurs en entreprise. Cela pour mieux souligner les progrès accomplis depuis quelques années : la prise de conscience par l'Université qu'elle ne peut accueillir la totalité des quelque 12 000 docteurs formés chaque année et les efforts qu'elle fait désormais pour les accompagner vers les entreprises, ainsi que la prise de conscience par les industriels qu'ils disposaient avec ces jeunes hyperformés d'une inestimable ressource à l'heure où R & D et innovation figurent en tête de leurs priorités.

Ainsi, *« les entreprises ont besoin de docteurs »*, affirme Alain Bovis, directeur Innovation et Recherche de DCNS, entreprise de haute technologie qui conçoit notamment des sous-marins et bâtiments pour la défense. Il souligne leurs atouts. Leur niveau de formation d'abord, qui permet à l'entreprise de disposer rapidement de chercheurs opérationnels et de qualité. Leur expérience de gestion de projet et du travail collaboratif, ensuite. Elle est en effet parfaitement adaptée aux besoins des entreprises : *« Nous menons aujourd'hui un tiers de nos recherches en mode collaboratif au sein de différents consortiums, bientôt ce sera les deux tiers. Dans ce contexte, l'habitude de ce mode de travail qu'ont les docteurs est une qualité précieuse. »*

Ce passage à l'industrie ne va pas toutefois sans un effort d'adaptation de la part des jeunes frais émoulus de leur doctorat. Car il y a des différences notables entre le travail de thèse et celui mené en entreprise. Docteur lui-même et aujourd'hui responsable R & D d'une start-up spécialisée dans les lidars, Léosphère, Jean-Pierre Cariou explique : *« La thèse consiste à mener une recherche le plus loin possible ; le chercheur n'a qu'une obligation de moyens. En entreprise, en revanche, il a une obligation de résultats, et il est* ...

Conférences, ateliers pratiques, témoignages, rendez-vous de recrutement, etc. étaient au programme.

ATELIERS ENTREPRISES

Les ateliers organisés lors de la manifestation Tremplin Doctorants Entreprises connaissent une fréquentation croissante. Les doctorants sont particulièrement friands d'informations et de conseils pratiques.

Armand Ajdari, directeur R & D du pôle Matériaux innovants de Saint-Gobain.

Les conseils des grandes entreprises

Les conseils aux étudiants peuvent venir des grandes entreprises. Saint-Gobain Recherche raconte ainsi son processus de recrutement. On y apprend que, pour chaque poste de chercheur proposé, l'unité de recherche reçoit de 150 à 200 CV, en sélectionne une dizaine pour des entretiens et que, au bout du compte, l'heureux élu doit être adoubé par le directeur général de l'entreprise. Marie-Claire Parent, directrice du service Ressources humaines de Saint-Gobain Recherche, souligne l'importance de la qualité de la lettre de motivation qui accompagne le CV et conseille : *« Il est très important que le docteur qui postule soit convaincu, et nous fasse partager sa conviction, qu'il est vraiment intéressé par la recherche dans l'industrie, ce n'est en effet pas tout à fait la même carrière que la recherche académique. »*

Sophie Houssiaux, directrice de projet R & D, BULL.

non seulement soumis au court terme – la vitesse de l'entreprise est quatre à cinq fois celle de la thèse – mais aussi à une grande mobilité des objectifs qui peuvent changer très rapidement. » L'arrivée en entreprise est ainsi souvent un « choc culturel », pour les jeunes chercheurs. Il rappelle également que les entreprises confient la recherche fondamentale aux laboratoires académiques et se focalisent sur la recherche appliquée.

Cela dit, Amandine Bugnicourt, cofondatrice d'Adoc Talent Management, cabinet de conseil en recrutement, spécialisé dans le public des docteurs, souligne pour sa part, en se fondant sur sa récente étude, *« la bonne adéquation entre les compétences des docteurs et les attentes de l'entreprise »*. Elle rappelle toutefois à cette occasion une condition *sine qua non* pour entrer dans l'entreprise : une excellente maîtrise de l'anglais. *« Nous constatons que les attentes des recruteurs sont beaucoup plus élevées que le niveau qui paraît suffisant aux doctorants »*, avertit-elle. À bon entendeur…

Faire découvrir l'entreprise aux doctorants est la motivation majeure de cette journée. Comme lors de l'édition précédente, les responsables scientifiques ou R & D de grands groupes et institutions s'étaient ainsi déplacés pour présenter leur activité, leurs besoins en matière de recherche et leur offre : l'ADEME, l'Institut Curie, le CEA, la SNCF, La Poste, Saint-Gobain, Dassault, Lafarge, Bull, PSA… Tous financent des thèses. Tous emploient un nombre significatif de docteurs. Tous en recrutent. Et certains, comme la SNCF, indiquent même leur volonté d'en faire plus. *« Nous avions, jusqu'en 2009, moins de dix thésards (Cifre) chaque année, et nous ne les gérions pas de façon optimale. Depuis, nous avons décidé non seulement de faire croître leur nombre et de mieux les rémunérer, mais aussi de les faire venir dans le cadre de prérecrutements et, surtout, de les mettre au cœur de nos programmes de recherche et d'innovation »*, explique Jean-Jacques Thomas, directeur scientifique et Projets d'innovation de la SNCF.

Près de 500 participants étaient présents à la deuxième édition de Tremplin Doctorants Entreprises.

ATELIERS ENTREPRISES

Les ateliers de relecture de CV du MESR et de l'ABG Intelli'agence.

Un CV adapté

Les conseils viennent aussi de PME comme Strategik & Numerik, agence de communication en santé, de 20 personnes. Dominique Charrier, sa directrice générale, exhorte : *« Faites un CV adapté à l'entreprise dans laquelle vous postulez ! »* Autrement dit inutile, quoi qu'il en coûte, de s'attarder sur tous les détails des recherches menées au cours de sa thèse si l'on postule, comme dans son entreprise, pour un poste de concepteur-rédacteur dans le domaine de la santé !

Marine Stupfel, chef de projet R & D, Laboratoire Servier.

Partage d'expérience

Les conseils viennent enfin de jeunes employés de l'industrie, hier encore doctorants, comme Marine Stupfel, docteur en chimie organique. Elle est aujourd'hui chef de projet en chimie analytique au laboratoire de R & D d'Orléans du groupe Servier. Elle souligne d'une part l'importance d'entamer très tôt la recherche d'un travail – elle a commencé six mois avant de soutenir sa thèse. Et comme beaucoup au cours de cette journée, elle insiste sur la nécessité de se créer un réseau en participant notamment à des écoles d'été, des congrès… Autant d'occasions de se constituer des contacts. Et de bâtir ce fameux réseau qui, comme le dit Marine Stupfel, *« cherche pour vous »* quand vous entreprenez de trouver un travail.

80 entreprises ont proposé près de 150 offres d'emploi lors de cette journée.

RENDEZ-VOUS DE L'EMPLOI

10e édition !

Le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR) n'en est pas à son coup d'essai. Il en est très précisément à la dixième édition de l'événement « Rendez-vous de l'emploi » et à la deuxième dans le cadre de Tremplin Doctorants Entreprises. Après une édition annuelle depuis 2005, « Rendez-vous de l'emploi » se tient plusieurs fois par an en France depuis deux ans. Cet événement est une aubaine pour tous les docteurs et doctorants en quête d'emploi. Il offre en effet une denrée rare : une rencontre de prérecrutement avec des représentants venus de grandes entreprises. Que demander de plus, sinon… d'être celui ou celle qui sera finalement choisi ? Cette année, plus de 1 300 étudiants ont déposé un dossier de candidature gratuit en ligne. Plus de 500 candidatures ont été retenues. Du côté de l'offre, ce ne sont pas moins de 80 entreprises de tous les secteurs industriels, PME comme grands groupes, qui proposaient quelque 150 offres d'emplois à des jeunes docteurs. Également au programme des « Rendez-vous de l'emploi », et en collaboration avec l'Intelli'agence, du conseil personnalisé pour les différentes phases de recrutement et des ateliers pratiques pour l'embauche.

SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Des savoir-faire à valoriser

« *Mon CV, ne passe pas la barrière des RH* », déplore cette doctorante en sociologie. C'est un fait. Les docteurs en lettres et sciences humaines et sociales – environ un tiers des docteurs – ne sont pas dans la même situation que leurs homologues des sciences dures. Trouver un emploi en entreprise reste pour eux un parcours du combattant. Tous ceux qui participaient à la table ronde dédiée au cas des docteurs en LSHS témoignaient de cette difficulté. Tous ont fini par trouver un emploi, mais le plus souvent après un parcours complexe qu'ils ne doivent qu'à eux-mêmes.

Deux points forts sont sortis des échanges sur ce sujet. Le premier est l'importance fondamentale du « réseau » qu'a su se constituer le docteur. Pour trouver un emploi, dans la pratique, le réseau est beaucoup plus efficace que les CV, convenaient tous les interlocuteurs. Il faut donc le cultiver au plus tôt. C'est encore plus vrai en LSHS qu'en sciences dures.

Le deuxième est la situation ambiguë des docteurs en LSHS. Ce n'est généralement pas le contenu – très pointu – de leur sujet de thèse qui conduit à leur embauche, mais les nombreuses qualités de ces « bac + 8 ». Ils sont, tout le monde en convient, autonomes, ouverts, adaptables, curieux, créatifs. Ils savent écrire. Ils savent parler. Ils savent apprendre. Défendre un point de vue. Gérer un projet. Bref, outre leurs connaissances, ils disposent de presque toutes les qualités que réclament les entreprises. Mais, finalement, qui le sait ? Et comment le faire valoir si votre CV « *ne passe pas la barrière des RH* » ? D'où ce plaidoyer de Monique Martinez Thomas, directrice du collège doctoral de l'université de Toulouse, pour que soient définis des « *référentiels de compétences transverses* ». De quoi faire savoir à tous ce dont est capable un docteur en LSHS. De quoi donner l'envie, au moins, de les rencontrer.

Les choses ne sont donc pas aisées. Elles commencent à s'améliorer toutefois. En effet, tous les ex-doctorants aujourd'hui en entreprise ont déploré le manque total d'accompagnement une fois la thèse réalisée. Pas de structure d'anciens élèves, pas de réseau, pas de soutien. Cela est en train de changer. Ici et là se mettent en place de telles structures d'accompagnement. Ailleurs des associations d'alumni (anciens élèves), comme à l'EHESS, voient le jour. C'est indispensable aux yeux de tous.

Il y a un autre aspect positif. L'entrée des docteurs en LSHS en entreprise crée une dynamique qui favorise… l'emploi de futurs docteurs en LSHS. Ce sera peut-être le cas, par exemple, à La Poste où deux chargés d'analyses stratégiques, Sébastien Richez et Hélène Delahaye, sont tous deux docteurs. Elle est sociologue et lui est historien.

En dépit d'une réputation de créativité et de polyvalence, les doctorants en LSHS peinent à convaincre les recruteurs. Pour eux, le réseau est essentiel dans la recherche d'emploi.

Geneviève Almouzni
© PEDRO LOMBARDI / INSTITUT CURIE

« FAIRE PROGRESSER LA RECHERCHE DE DEMAIN »

Geneviève Almouzni, PhD, directrice d'unité Institut Curie/CNRS et directrice déléguée à l'enseignement du Centre de recherche de l'Institut Curie, revient sur l'accompagnement des doctorants et leur formation à l'Institut Curie.

Quel est, pour l'Institut Curie, l'intérêt de faire appel à des doctorants, en quoi est-ce une valeur ajoutée ?

Geneviève Almouzni : L'une des trois missions prioritaires de l'Institut Curie est l'enseignement. Accueillir des doctorants dans nos laboratoires participe à la diffusion des compétences et des connaissances pour faire progresser la recherche de demain et ainsi lutter contre le cancer. Les doctorants apportent une vision nouvelle, une autre approche et participent au succès de l'Institut Curie et à l'avancée de la recherche. Nous sommes ainsi en permanence à la recherche de nouveaux talents en France et à l'étranger afin de recruter des doctorants.

Combien y a-t-il de doctorants à l'Institut Curie ?

G. A. : Il y avait au total en 2011, 233 doctorants au sein de l'Institut Curie. Ils représentent aujourd'hui 18 % des effectifs du Centre de recherche et sont chaque année plus nombreux. Leur nombre a crû de 46 % en dix ans. Chaque année, nous recrutons environ 50 nouveaux doctorants et nous finançons 10 thèses dans le cadre du programme doctoral international. Ce programme financé par l'Institut Curie s'adresse aux étudiants étrangers. En 2011, 19 de nos doctorants en étaient des bénéficiaires. L'Institut Curie finance également des thèses de sciences (une par an) et des masters sciences (deux par an) pour les médecins.

Comment l'Institut Curie forme-t-il les doctorants et les accompagne-t-il dans leurs recherches ?

G. A. : Nous nous sommes dotés d'une « Cellule Enseignement » qui a conçu de nombreux outils au profit des doctorants. Ainsi, nous avons mis en place un suivi de qualité qui les accompagne tout au long de leur parcours. Cela se traduit par des réunions d'accueil en début d'année pour présenter l'offre de formation, les personnes contacts, etc. Ensuite, dans chaque unité, un « référent enseignement » a été identifié. Enfin, un comité de thèse est mis en place pour chaque doctorant. À cela s'ajoute la pratique du « mentoring » : les doctorants en première année sont parrainés par des doctorants plus avancés ou des postdoctorants. Chaque doctorant encadré deviendra à son tour un encadrant.
En ce qui concerne la formation proprement dite, l'Institut organise des cours internationaux et des cours génériques. Les premiers visent à promouvoir des enseignements de haut niveau et à faire connaître nos jeunes équipes. Les cours génériques, eux, sont orientés vers l'utilisation de technologies de pointe développées sur nos plates-formes, telles que la cytométrie, la bio-informatique, la spectrométrie de masse, le séquençage haut débit…

L'Institut Curie embauche-t-il des doctorants ?

G. A. : Pour ses activités de recherche, l'Institut Curie embauche des postdoctorants qui ont effectué leur thèse dans des laboratoires d'autres institutions. En effet, dans le secteur de la recherche, il est fortement recommandé de faire son postdoctorat dans un laboratoire différent de celui de sa thèse. Ainsi, les doctorants ayant réalisé leur thèse à l'Institut Curie ne pourront effectuer leur postdoctorat chez nous. Néanmoins, certains chercheurs travaillant à l'Institut Curie y ont aussi effectué leur thèse ou leur postdoctorat.

Quel est alors le parcours des docteurs que vous avez formés ?

G. A. : Une partie importante s'oriente vers la recherche et effectue donc des post-docs en France ou à l'étranger. Mais les autres débouchés ne manquent pas : l'industrie, dans les biotechnologies ou la pharmacie, l'enseignement, le journalisme scientifique, le conseil en brevet… On voit même aujourd'hui apparaître un nouveau métier, celui de coordinateur de projet de recherche. Cette activité est liée à l'évolution du financement de la recherche et s'exerce soit au sein de laboratoires, soit dans des entreprises de conseil.

3 QUESTIONS À

DANIEL CLÉMENT
Directeur scientifique adjoint ADEME

L'ADEME COFINANCE 60 NOUVELLES THÈSES CHAQUE ANNÉE. POURQUOI ?

Daniel Clément : La formation de docteurs sur tous les sujets qui touchent à l'environnement et à la maîtrise de l'énergie est pour nous le moyen de participer à la structuration du milieu français de la recherche. C'est aussi une façon de former les cadres qui accompagneront l'ADEME, les entreprises et les collectivités territoriales dans le développement de ces secteurs. Plus de 70 % de nos thésards trouvent un emploi dans des domaines de compétences liés aux activités de l'ADEME. J'ajouterai enfin qu'il est très important de réconcilier les jeunes avec la science. Les recherches que nous menons jouent à cet égard un rôle très positif.

QUELS SONT VOS DOMAINES DE PRÉDILECTION ?

D. C. : Notre ambition a toujours été de faire travailler nos doctorants sur des sujets émergents. Des sujets de plus en plus transversaux, et qui seront à l'ordre du jour dans trois à cinq ans, au moment où ils auront achevé leur travail de thèse. Par exemple, il y a cinq ans un sujet de thèse typique pouvait porter sur le réseau électrique intelligent, qui est actuellement en pleine phase de développement.

QUEL TYPE DE CHERCHEURS FORMEZ-VOUS ?

D. C. : Nous avons vocation à former des spécialistes de la recherche industrielle, à mi-chemin entre la recherche fondamentale et le développement expérimental. Autrement dit des chercheurs capables de traduire les connaissances nouvelles en méthodes utilisables. Ces connaissances ne portent pas que sur la technologie, mais aussi sur leurs impacts toxicologiques éventuels, sur la compréhension des comportements, des organisations, ou sur les questions de droit qui peuvent être associées.

JEAN-LUC ZIMMERMANN / INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLÉAIRES

1 500 doctorants au CEA !

Leurs travaux concernent le nucléaire, mais aussi les énergies nouvelles, les technologies pour l'information et la santé, la défense et la sécurité globale.

Combien accueillez-vous de doctorants au CEA?

Jean-Luc Zimmermann : Quelque 1 500 doctorants préparent leur thèse dans les laboratoires des dix centres du CEA. La durée d'une thèse étant en moyenne de trois ans, nous accueillons donc 500 nouveaux doctorants chaque année. Nous recrutons les futurs docteurs dans le monde entier, et quelque 30% d'entre eux ont obtenu leurs diplômes dans une université étrangère.

Sur quels thèmes travaillent-ils?

J.-L. Z. : Le CEA est encore très souvent identifié aux seules activités liées à l'énergie nucléaire. En réalité, depuis longtemps, ses thématiques de recherche ont largement dépassé ce seul secteur d'activité. Son nom en témoigne d'ailleurs. CEA signifie désormais Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Ainsi, les doctorants qui effectuent leur thèse dans nos laboratoires travaillent dans l'un des domaines liés aux quatre grands axes stratégiques du CEA : énergies bas carbone, technologies pour l'information et la santé, très grandes infrastructures de recherche et, enfin, défense et sécurité globale. Par exemple, les recherches menées par nos doctorants contribuent directement à la définition et mise au point des systèmes nucléaires du futur, des nouvelles technologies pour l'énergie comme la filière hydrogène, la pile à combustible, les systèmes de conversion de l'énergie solaire, les batteries électriques et la biomasse. D'autres travaillent dans les micro et nanotechnologies, les technologies logicielles ou les biotechnologies.

À côté de ces recherches à vocation technologique, près de la moitié de nos doctorants travaille sur des projets en recherche fondamentale (mathématiques, physique, chimie, sciences du vivant) qui viennent en appui de nos axes stratégiques. Les projets de thèse menés au CEA peuvent donc intéresser à la fois les étudiants plus attirés par la connaissance scientifique en tant que telle et les étudiants souhaitant travailler dans un projet de recherche à vocation appliquée.

Jean-Luc Zimmermann, chef du Service formation par la recherche et emploi scientifique à l'INSTN, établissement d'enseignement supérieur rattaché au CEA.

Que font les docteurs après avoir soutenu leur thèse?

J.-L. Z. : Dans l'année qui suit leur thèse, pour commencer, environ 10% de nos doctorants sont recrutés… au CEA. Il faut en effet savoir qu'au CEA les recrutements d'ingénieurs-chercheurs concernent pour moitié des docteurs et pour moitié des ingénieurs sans doctorat. Mais les activités ne seront pas forcément les mêmes. Pour les autres, environ un tiers entreprend un stage de postdoctorat. Ce stage est pratiquement indispensable pour poursuivre dans la recherche publique mais le postdoctorat est aujourd'hui aussi souvent requis pour obtenir un poste de chercheur dans l'industrie. Néanmoins, plus d'un quart de nos doctorants sont embauchés directement dans l'industrie à la suite de leur thèse, en particulier dans les domaines des sciences de l'ingénieur. Dans ce cas, en effet, le stage postdoctoral n'est pas une nécessité. La variété des postes tenus par les anciens doctorants du CEA démontre donc qu'une thèse bien menée ouvre des horizons professionnels nouveaux pour l'étudiant !

Avec le soutien de : My Science Work

- **Rédaction :** Franck Barrau
- **Reportage photographique :** Camille Millerand
- **Conception graphique et réalisation :** A noir.

Agenda

Jusqu'au 5 mai 2013

Domestication : l'empreinte de l'homme

Exposition. L'histoire de la domestication des animaux, de l'Antiquité à nos jours, est retracée à travers cette exposition qui explique pourquoi et comment elle a eu lieu, et les effets de cette pratique sur les animaux et la biodiversité. Une partie de l'exposition est spécialement consacrée à l'histoire de l'élevage en Auvergne.

Clermont-Ferrand, muséum Henri-Lecoq. http://tinyurl.com/domestication-animale

Le 8 janvier, 20 h 30

Vétérinaire pour animaux sauvages

Conférence. Comment un vétérinaire peut-il soigner les animaux sauvages ? Directeur du laboratoire départemental vétérinaire et d'hygiène alimentaire des Hautes-Alpes, Dominique Gauthier raconte son métier, explique comment il étudie le comportement des animaux et analyse la transmission des maladies afin de réduire les risques et protéger la faune sauvage.

Lyon, musée des Confluences. http://tinyurl.com/confluence-animaux-sauvages

Le 10 janvier, 11 h

Parler d'astrophysique grâce à la fiction

Conférence. Les œuvres de science-fiction regorgent de référence à l'astronomie et à l'astrophysique. Éveillant la curiosité, elles permettent d'aborder les connaissances scientifiques actuelles. Roland Lehoucq, astrophysicien au CEA, adopte cette démarche et s'interroge sur la nature de *L'Étoile mystérieuse* de Tintin ou de la « Force » qu'utilisent les chevaliers Jedi dans *La Guerre des Étoiles*.

Meudon, observatoire. http://luth.obspm.fr/seminaires/

Le 10 janvier, 18 h

Arts et sciences, des imaginaires communs

Conférence. Arts et sciences suivent deux chemins menant à la vérité ? Yannick Butel, du laboratoire d'études en sciences des arts, s'intéresse aux formes de connaissances que produisent artistes et scientifiques. Il nous présente les points communs et les différences de leurs démarches.

Marseille, CNRS. http://tinyurl.com/cnrs-art-et-science

Le 12 janvier, 14 h 30

Notre Galaxie en 3D

Conférence. Le satellite Gaïa, de l'Agence spatiale européenne, sera lancé en 2013 pour mesurer les distances, positions et vitesses des étoiles de notre Galaxie, et constituer un catalogue en trois dimensions de la Voie lactée. Céline Reylé, de l'observatoire de Besançon, explique par le menu le projet et ses enjeux scientifiques.

Besançon observatoire. http://tinyurl.com/obs-besancon-gaia

Le 14 janvier, 19 h

Quoi de neuf au royaume des textiles ?

Conférence. Fini, les textiles qui se contentent de nous habiller et de nous protéger : ces matériaux, souples, fins et résistants deviennent intelligents. Marie-Ange Bueno et Aziz Lallam, de l'université de Haute-Alsace, passent en revue leurs applications, par exemple pour conduire l'électricité ou faire jaillir la lumière.

Paris ESPCI ParisTech. http://tinyurl.com/textile-intelligent

Le 15 janvier, 19 h 30

Le ciel, entre science et religion

Cycle de conférences. Quel rapport entretient l'Église romaine avec la science contemporaine ? C'est sur ce thème que Philippe Portier, directeur d'études à l'École pratique des hautes études inaugure ce cycle de conférences organisées par l'Institut d'astrophysique de Paris et l'Institut européen en science des religions. Un cycle construit autour des liens entre science et religion et leurs différentes approches du ciel !

Paris, Institut d'astrophysique. http://tinyurl.com/ciel-science-religion

Le 22 janvier, 20 h

La zone de minimum d'oxygène au large du Pérou

Conférence. Dans certaines zones de l'océan, l'oxygène se fait rare. Depuis une cinquantaine d'années, du fait du réchauffement climatique et des activités humaines, ces zones se sont étendues, jusqu'à couvrir près de 10 % de l'océan mondial. Arnaud Bertrand, de l'Institut de recherche pour le développement, explique les conséquences de ce phénomène sur la faune au large du Pérou.

Toulouse, observatoire Midi-Pyrénées. http://tinyurl.com/perou-ocean-faune

Le 23 janvier, 14 h

Étonnantes inventions de l'entre-deux-guerres

Conférence. L'Office national des recherches scientifiques, industrielles et des inventions voit le jour en 1919. Pendant 20 ans, de nombreuses inventions y sont conçues, aussi différentes que la voiture à gazogène et le sèche-linge. L'historien André Guthleben, attaché scientifique au comité pour l'histoire du CNRS, ressort des archives inédites pour retracer l'activité intense qui animait ces laboratoires.

Poitiers, campus de l'université. http://tinyurl.com/inventions-archives

Dinosaures, la vie en grand

Les sauropodes étaient les plus grands dinosaures de tous les temps : ils pouvaient être longs de 40 mètres, et peser jusqu'à 90 tonnes. Mais comment ces herbivores trouvaient-ils leurs 100 000 calories quotidiennes ? Comment circulaient leurs 600 litres de sang ? Comment leurs poumons véhiculaient-ils 75 litres d'air par inspiration ? L'exposition décortique tous ces mécanismes biologiques. Et un système de projection sur une reproduction de l'animal de 18 mètres, qui trône au cœur de l'exposition, permet de comprendre leur fonctionnement, en situation. Partout, le gigantisme de ces animaux est mis en scène en les comparant aux animaux actuels. Quelques expériences didactiques sont proposées, en particulier au jeune public, qui peut participer à la recherche de fossiles dans un chantier de fouilles.

Jusqu'au 13 mai, Paris, Muséum national d'histoire naturelle.

Anniversaire

IL Y A 160 ANS, CHARLES DARWIN recevait la médaille royale de l'Académie des sciences britannique, la Royal Society, pour ses travaux de biologie. Mais son influence dépasse les frontières de cette discipline, comme le montre Sylvie Méléard, présidente du département de mathématiques appliquées de l'École polytechnique. Sa conférence abordera d'un point de vue mathématique la théorie de l'évolution décrite dans *L'Origine des espèces* en 1859. Celle-ci expose la façon dont le hasard intervient dans la variabilité des caractères entre les individus, ainsi que dans leur survie. S'inspirant de ces observations, des mathématiciens ont modélisé l'évolution des populations.

> Le 23 janvier, à 18 h 30, Paris, BNF.

Le 23 janvier, 15 h 30

Au plus profond des mers

CONFÉRENCE. La conquête des grandes profondeurs par la Marine nationale et le CNRS commence dans les années 1950. Jean Jarry, ingénieur à l'Ifremer, a participé à la mise en œuvre des submersibles habités, et a plongé jusqu'à plus de 9 000 mètres dans la fosse du Japon. Il nous raconte l'histoire de l'exploration sous-marine telle qu'il l'a vécue.

Plouzané, centre Ifremer. http://tinyurl.com/exploration-sous-marine

Le 24 janvier, 18 h

L'ours des cavernes, un géant préhistorique

CONFÉRENCE. Fossilisé en abondance dans les grottes, l'ours des cavernes a fasciné depuis le XIXe siècle les paléontologues et les préhistoriens. Évelyne Crégut, conservatrice du muséum Requien d'Avignon, explique comment la biochimie et la génétique ont réécrit l'histoire de ce géant préhistorique.

Nice, musée d'archéologie Terra Amata. www.musee-terra-amata.org

Le 24 janvier, 18 h 30

La partition numérique

CONFÉRENCE. Exploité pour la création musicale, l'ordinateur est devenu un outil de composition, un instrument et même un musicien. Arshia Cont, de l'Inria, prix *La Recherche* 2011, et Myriam Desainte-Catherine, du laboratoire bordelais de recherche en informatique, montrent comment de nouvelles formes d'orchestre peuvent être conçues grâce à cet outil de calcul.

Paris, musée des Arts et Métiers. http://tinyurl.com/partition-numerique

Jusqu'au 27 janvier

Volcans, la vie de la Terre

EXPOSITION. Qu'ils soient éteints ou encore actifs, les volcans témoignent de la lente agitation souterraine qui anime notre planète. Maquettes, manipulations et panneaux font découvrir les éruptions, le magma ou les cendres volcaniques, qui bien que destructrices peuvent fertiliser le sol.

Tours, muséum d'Histoire naturelle. http://tinyurl.com/museum-tours-volcan

Le 28 janvier, 19 h

Gouttes en mouvement

CONFÉRENCE EXPÉRIMENTALE. Moins anodines qu'on le pense souvent, les gouttes d'eau peuvent rendre un verre opaque, favoriser la corrosion ou le vieillissement d'un matériau. David Quéré, de l'Espci ParisTech, et Élise Lorenceau, de l'université de Marne-la-Vallée montrent notamment comment contrôler les mouvements des gouttes d'eau sur une surface.

Villefontaine, théâtre du Vellein. http://tinyurl.com/gouttes-d-eau-et-materiau

Jusqu'au 3 mars

Anatomies de l'étrange

EXPOSITION. Comment se construisent nos représentations du fantastique et du monstrueux ? Le Muséum exhibe des pièces rares de ses collections zoologiques et ethnographiques, qui suscitent l'étonnement ou l'incompréhension. L'exposition interroge les fantasmes qui entourent les animaux étranges et les objets témoignant des pratiques ethnographiques de sociétés éloignées.

Lille, muséum d'Histoire naturelle. http://tinyurl.com/anatomie-etrange

Le mois prochain dans La Recherche

Dossier

Réchauffement climatique : ce qui nous attend vraiment

En 2013, les scientifiques du Groupe intergouvernemental d'études sur le climat publieront leur cinquième rapport sur l'état des connaissances à propos du réchauffement climatique et de ses conséquences. Comment le préparent-ils ? Qu'est-ce qui va changer par rapport à la précédente synthèse ?

Savoir

Les astrocytes, les cellules qui contrôlent les neurones

Entretien

Éric Brian,

historien des relations entre mathématiques et économie

N° 472 • EN VENTE LE 24 JANVIER 2013

Serrons-nous la main

Les politiciens et les hommes d'affaires le savent bien : rien ne vaut une franche poignée de main pour bien entamer une discussion. Et ce ne sont pas les psychologues américains de l'université de l'Illinois qui les démentiront. Spécialisés en cognition sociale, ces chercheurs pensent avoir démontré scientifiquement l'impact positif d'une poignée de main. Pour ce faire, ils ont présenté à 18 sujets des animations mettant en scène une rencontre professionnelle entre deux personnes, tout en enregistrant par IRM fonctionnelle l'activité neuronale des spectateurs. Les films débutaient ou non par une poignée de main. Lorsque les personnages se serraient la main, certaines zones du cerveau connues pour jouer un rôle dans la socialisation s'activaient. Preuve pour les auteurs que cette action encourage à l'ouverture sociale, à la confiance et à la coopération. Reste à savoir si ces zones du cerveau s'activent s'il s'agit d'une main moite et molle. http://tinyurl.com/poign-e-de-main

Char à crottes

La guerre nucléaire appartient au passé ! C'est du moins ce qu'a récemment confié Aleksandr Semenov à la presse tchèque. Ce Russe est l'inventeur du « char qui tire des excréments », arme brevetée en 2009 et qui pourrait, selon lui, révolutionner l'art de la guerre. Le char est équipé d'un dispositif permettant de récolter les fèces du soldat qui conduit et de les emprisonner dans une douille comprenant de l'explosif. L'obus tiré, s'il possède un faible impact destructeur, n'en demeure pas moins une arme puissante ! Car son effet est double. L'un positif, pour les occupants du char, qui se débarrassent des excréments nauséabonds. L'autre négatif, pour l'adversaire qui, aspergé de matières fécales, peut avoir le moral sérieusement miné. http://tinyurl.com/char-crotte

Quand la police apprécie les graffitis

Si dans l'Indiana les policiers photographient les graffitis avec leur smartphone, ce n'est pas par amour de l'art de rue. Mais bien pour lutter contre la guerre des gangs, qui communiquent souvent par tags interposés. Depuis quelques mois, la police américaine d'Indianapolis dispose d'une application mobile mise au point par des ingénieurs de l'université Purdue, qui enregistre, analyse et aide à décoder les graffitis pris en photo. Grâce à un algorithme qui étudie la couleur, le graphisme et les coordonnées géographiques des inscriptions, le policier-photographe reçoit toutes les informations susceptibles d'être liées au message découvert. L'application est uniquement disponible sous Android. Les policiers à iPhone devront se débrouiller sans téléphone ! http://tinyurl.com/graffiti-android

À croquer ou à sucer

À quoi pense un chercheur lorsqu'il mange un bonbon ? S'il est gourmand, à l'image du physicien autrichien Andreas Windisch, il se demande comment en tirer un maximum de plaisir. Suit logiquement l'expérience qui vise à étudier la dissolution d'un bonbon sphérique au cours du temps. En l'occurrence, il a analysé la vitesse de disparition de bonbons plongés dans de l'eau à l'acidité proche de celle de la salive. Contrairement à ce qu'attendait Andreas Windisch les friandises ne disparaissaient pas de plus en plus en vite, mais à vitesse constante. Tout est dans la forme sphérique du bonbon. Cette forme offre en effet la surface minimale de contact avec la salive. Publié dans *Physics Education*, ce résultat mène à des conseils pratiques. À ceux qui aiment faire durer le plaisir : il faut s'appliquer à maintenir la forme sphérique de la confiserie. À ceux qui privilégient l'intense sur le durable, le physicien conseille de croquer directement le bonbon : radical certes, mais la saveur libérée sera puissante. http://tinyurl.com/bonbon-dissolution

© PHOTOTHEK/ANDIA.FR - PURDUE UNIVERSITY, VIDEO AND IMAGE PROCESSING LABORATORY

9e édition

CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

Inventer pour le monde de demain

Catsaï Design - istockphoto - Shutterstock

5 000 EUROS À GAGNER

DÉPÔT DES DOSSIERS AVANT

LE 30 AVRIL 2013

www.concoursgenerationd2.com

Un événement

LA Recherche
L'actualité des sciences

ADEME

Avec le soutien de

ANOUS letudiant.fr terraeco

Vous avez un projet de thèse ? L'ADEME vous accompagne.

Étudiants, laboratoires, entreprises ou collectivités territoriales, contribuez par vos recherches, votre soutien technique ou vos financements à relever les défis d'aujourd'hui et demain dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Étudiants, entreprises, laboratoires, collectivités locales, collaborez avec l'ADEME

Au cœur des missions de l'agence en matière de recherche depuis 1992, ce programme a permis la formation par la recherche de plus 1 500 étudiants avec 60 % des thèses portant sur des procédés technologiques, 25 % sur les sciences de l'environnement et de la vie et 15 % sur les sciences humaines et sociales entre 1998 et 2009.

Dans ce dispositif, l'ADEME est acteur au sein d'un partenariat de 3 ans complet et équilibré, alliant **laboratoires, entreprises et collectivités**. Autour de chaque doctorant, la complémentarité des acteurs permettra d'explorer de nouveaux champs de connaissances scientifiques et technologiques dans les domaines d'intervention de l'Agence en tenant compte des attentes sociétales.

Sélection sur appel à candidatures chaque année du 1er janvier au 31 mars.

Pour plus d'informations : **www.ademe.fr/theses**

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr